

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Ing. David Košťál

EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM UTVÁŘENÍ MAZACÍCH FILMŮ ZA PODMÍNEK NEDOSTATEČNÉHO ZÁSOBOVÁNÍ KONTAKTU MAZIVEM

EXPERIMENTAL STUDY OF THE LUBRICANT FILM UNDER STARVED CONDITIONS

Zkrácená verze disertační práce

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

Klíčová slova:

Tribologie, mazání, EHD, hladovění, nedostatečné zásobování mazivem, tloušťka mazacího filmu na vstupu,

Keywords:

Tribology, lubrication, EHD, starvation, parched lubrication, inlet film thickness,

Místo uložení práce:

Oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně.

OBSAH

1	ÚVOD	4
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	5
2.1	Pokroky v oblasti tribologie	5
2.2	Hladovění	6
2.3	Pohyb maziva – efekt doplňování	10
2.4	Analýza a zhodnocení poznatku získaných na základě rešerše	12
3	VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	14
4	MATERIÁLY A METODY	15
4.1	Experimentální část	15
4.2	Teoretická část.....	18
5	VÝSLEDKY A DISKUZE	19
5.1	Kvantifikace hladovění.....	19
5.2	Slabá místa navržené metody	19
5.3	Doplňování maziva – vliv vzájemné vzdálenosti kontaktů	20
5.4	Poměr dělení maziva po průchodu kontaktem	23
5.5	Vliv tloušťky maziva na vstupu kontaktu na úroveň hladovění.....	27
5.6	Vliv parametru γ na závislost hoil na h_c	31
5.7	Vliv chyb a jejich analýza	32
6	SHRNUTÍ A ZÁVĚR	33
7	LITERATURA.....	35
8	CURRICULUM VITAE	38

1 ÚVOD

Elastohydrodynamický (EHD) režim mazání, kterým se zabývá tato práce, byl objeven a poprvé popsán zkraje 20. století. Objasnění procesu EHD mazání patří mezi jedny z nejvýznamnějších poznatků vědního oboru tribologie.

Inženýrské aplikace využívající vlastnosti elastohydrodynamického mazání jsou všechny, které zahrnují malé kontaktní oblasti za vysokých kontaktních tlaků. To jsou například vačkové mechanismy, valivá ložiska, ozubení apod. Současné trendy ve všech těchto oblastech vyžadují minimalizaci energetických ztrát za současného prodlužování životnosti kontaktních povrchů a zvyšování přenášovaných výkonů.

Hodnoty potencionálního opotřebení a tření mají úzkou návaznost na hodnotu tloušťky mazacího filmu elastohydrodynamického kontaktu, který odděluje mazané povrchy. Jeho tloušťka je za běžných okolností definována na základě hodnot rychlosti třecích povrchů, jejich geometrií, vlastností maziva, okolní teplotou, zatížením a několika dalšími parametry. Pokud je k dispozici dostatečné množství maziva, tak se kontakt označuje za plně zaplavený.

Za specifických podmínek, zejména je to nedostatečný objem maziva či jeho nevhodné parametry, může dojít ke snížení tloušťky mazacího filmu na nižší hodnoty a takovýto kontakt se označuje za hladovějící či za nedostatečně zásobovaný mazivem. Ve většině případů se jedná o defektní situaci, která výrazně zvyšuje riziko interakce kontaktních povrchů a tím i opotřebení. Tloušťka mazacího filmu se může snížit až na hodnotu drsnosti kontaktních povrchů a poté může v kontaktu vrcholů nerovností docházet k dřívější iniciaci únavového poškození typů pitting či spalling. Z tohoto důvodu existuje obecná snaha o co nejkvalitnější porozumění mechanismů doprovázejících hladovění za účelem jeho predikce a včasné eliminace, ideálně ještě ve fázi návrhu tribologických uzlů.

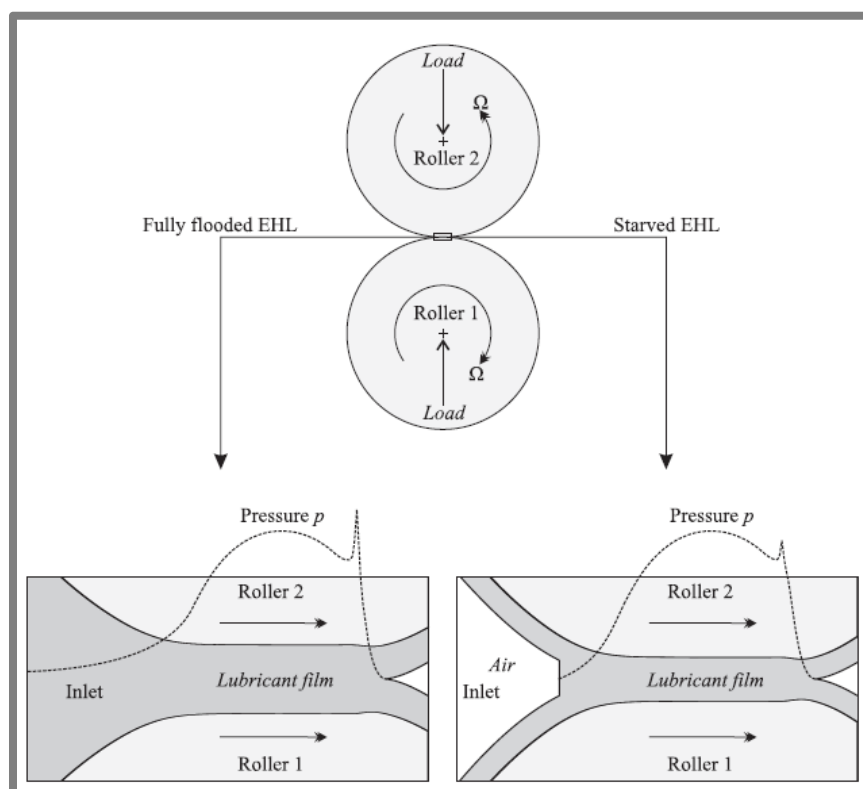
Během posledních let vznikly teoretické modely, které komplexněji popisují tento problém a dokáží předpovědět úroveň hladovění. Experimentální ověření těchto modelů je nicméně doposud nedostačující. Lepší pochopení jevů provázejících počátek a samotný proces hladovění by umožnilo lepší návrh a kontrolu strojních součástí. To by ve výsledku znamenalo úsporu nákladů na výměnu těchto součástí a eliminaci časových prodlev způsobených havarijními odstávkami z důvodů výměn či celkové snížení energetické náročnosti provozu.

Disertační práce obsahuje nejen některé doposud nepublikované výsledky, ale také popis některých publikací autora souvisejících s tématem práce a výsledky v nich obsažené.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 POKROKY V OBLASTI TRIBOLOGIE

Během posledního století došlo k výraznému pokroku v kvalitě součástí strojů. Běžný tlak, rychlost, přesnost a životnost vzrůstají, zatímco velikost, hmotnost a cena klesá. Toho bylo docíleno za pomoci zlepšování geometrie, materiálů, způsobu výroby a v neposlední řadě také pokrokem v oblasti tribologie. Další důvod je ovšem také přiblížení bezpečnostních mezí blíže mezním stavům. Důsledkem toho je zvýšená potřeba umět přesně předvídat všechny provozní parametry, včetně těch, které se týkají mazání, aby se předešlo selhání komponent ještě během jejich plánované životnosti [1].



Obr. 2.1 Rozdíl distribuce maziva v plně zaplaveném a hladovějícím kontaktu [2]

Množství maziva dodávaného do elastohydrodynamicky mazaného (EHL) kontaktu má vliv na tloušťku mazacího filmu. Na Obr. 2.1 lze pozorovat rozložení tloušťky mazacího filmu a tlaku při průchodu kontaktem vytvářeným mezi dvěma se odvalujícími válci. Na levém detailu lze vidět plně zaplavený kontakt a na pravé straně hladovějící kontakt.

Při plně zaplavených podmínkách (levý detail Obr. 2.1) je mezera mezi dvěma tělesy kompletně zásobována mazivem. Konvergující mezera, která je vytvářena geometrií těles a jejich deformacemi, způsobuje, v kombinaci s relativním pohybem, vtahování maziva do kontaktu. Díky geometrii mezery dochází k nárůstu tlaku v mazivu, výraznému zvýšení viskozity a tím generování vrstvy maziva, která plně odděluje tělesa [3].

Při podmínkách hladovění [1], [4], [2] (pravý detail obr. 1) je dostupná oblast pro nárůst tlaku značně zmenšena. V oblasti, kde v případě plně zaplaveného kontaktu již nárůst probíhal, totiž není k dispozici mazivo. V tomto případě je průběh tlaku v kontaktu rozdílný v porovnání s plně zaplaveným kontaktem, což sekundárně způsobí menší tloušťku mazacího filmu mezi povrchy.

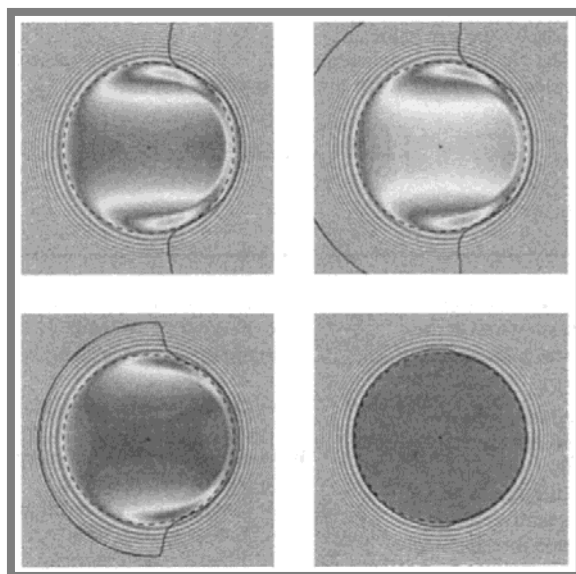
2.2 HLADOVĚNÍ

První studie, zabývající se pojmem hladovění, zkoumali závislost mezi valivou rychlostí a centrální tloušťkou mazacího filmu. Při plně zaplaveném režimu je tento průběh, vyneseny v grafu s logaritmickými osami, ve formě rostoucí přímky. Při projevu hladovění dojde s dalším navyšováním rychlosti k poklesu tloušťky namísto dalšího růstu.

Prvními, kdo se zabýval výzkumem hladovění, byli Orcutt a Cheng [5], kteří pozorovali posun vstupní hranice (dále označovaná jako vstupní meniskus) blíže ke kontaktu. Autoři se zabývali posunem menisku blíže ke kontaktu při zvyšující se úrovni hladovění a definovali vstupní hranici jako oblast limitující nárůst tlaku před kontaktem, což je činitel způsobující snižování tloušťky vůči plně zaplavenému kontaktu.

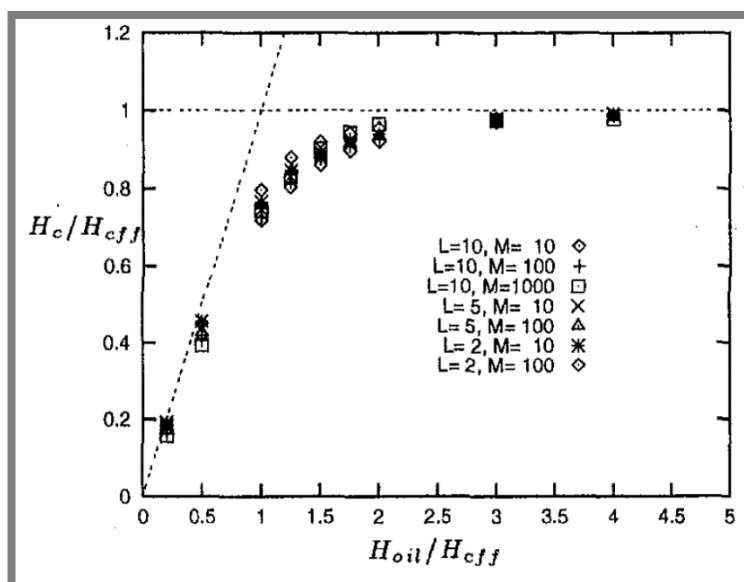
Jako další významnou studii lze považovat práci Hamrocka a Dowsona [6], kteří poskytli kompletní přístup k řešení EHL bodového kontaktu. Nejvýznamnější v této doplnění vyvinutého modelu o kvantifikaci redukce tloušťky mazacího filmu při hladovějících podmínkách. Autoři našli jednoduchý vztah bezrozměrných veličin, kterým lze popsat redukci centrální resp. minimální tloušťky mazacího filmu v závislosti na poloze hranice vstupní oblasti.

Ve všech do té doby uvedených studiích byla úroveň hladovění zjišťována či kontrolována vždy pomocí parametru definujícího vzdálenost hranice vstupní oblasti od hranice tlakové oblasti. Obecně lze říci, že čím menší je tato vzdálenost, tím je větší redukce tloušťky mazacího filmu.



Obr. 2.2 Poloha vstupního menisku dopočítaná při definované tloušťce maziva před kontaktem [4].

Chevalier a kol. [4] poznamenali, že takto definovaná kontrola úrovně redukce mazacího filmu je nepraktická. Se zvyšující se úrovní hladovění začíná být tloušťka filmu na poloze hranice vstupní oblasti extrémně citlivá a v reálných aplikacích se jedná o téměř neměřitelnou hodnotu. Dalším problémem je, že v případě pokračujícího hladovění dochází k sloučení těchto dvou hranic, přičemž redukce tloušťky mazacího filmu stále pokračuje. Pro vysoké úrovně hladovění je tento přístup tedy nepoužitelný.



Obr. 2.3 Centrální tloušťka mazacího filmu jako závislost tloušťky filmu na vstupu kontaktu [4]

Namísto této polohy autoři využili pro kontrolu úrovně hladovění tloušťku maziva H_{oil} , kterou má EHD kontakt k dispozici na vstupu kontaktu. Za pomoci tohoto parametru lze poté obdržet jak polohu vstupního menisku (hranice vstupní oblasti na Obr. 2.2), tak také redukci centrální tloušťky.

Na Obr. 2.3 lze pozorovat, že křivky hladovění pro různé podmínky (Moes) jsou téměř identické. Drobný rozptyl je diskutován jako vliv provozních podmínek, ten je ovšem minimální. Současně je diskutováno, že nedochází ke konvergenci výsledků s asymptotami. To je dááno za vliv vlivu stlačitelnosti maziva a dále v článku také prokázáno. V druhé části práce je analyticky zkoumán vliv opakovaného průchodu maziva kontaktem a vliv na degradaci mazacího filmu. Je zde představen jednoduchý vzorec (2.1), který definuje redukci mazacího filmu po každém dalším odvalení.

$$R(n) = \frac{1}{\sqrt[\gamma]{\frac{1}{r_0^\gamma} + n}} , \quad \lim_{n \rightarrow \infty} R(n) = n^{\frac{-1}{\gamma}} \quad 2.1$$

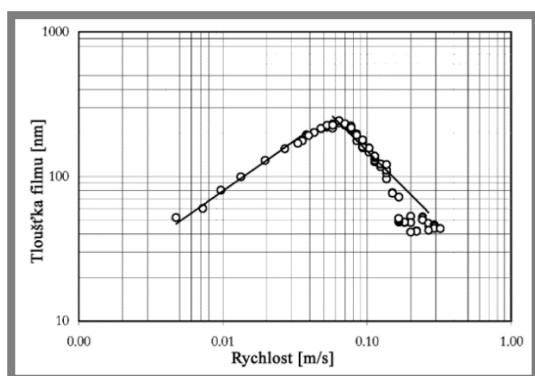
n	- počet průchodů kontaktem
R	- redukce centrální tloušťky mazacího filmu ($H_c/H_{c\text{ff}}$)
γ	- odpor proti bočnímu tečení (Pro EHL ~ 2 a 5)
r_0	- relativní tloušťka mazacího filmu $H_{oil} / H_{c\text{ff}} / \rho$
ρ	- bezrozměrná hustota

Díky tomuto modelu lze polohu menisku a redukci centrální tloušťky dopočítat z tloušťky maziva na vstupu kontaktu. Tento přístup je navíc vhodný pro popis kterékoliv úrovně hladovění. Jeho nevýhodou je absence experimentální verifikace, jelikož množství maziva v řádech desítek až stovek nanometrů se velmi obtížně vytváří.

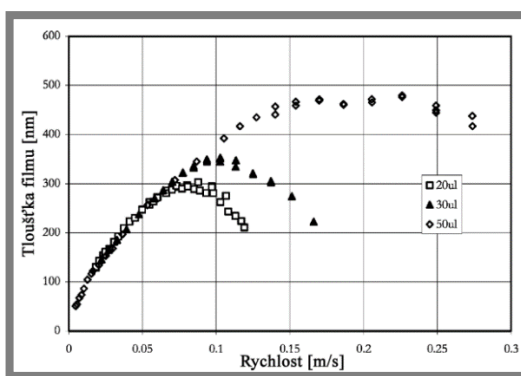
Dalším významným přínosem bylo definování poklesu tloušťky mazacího filmu v důsledku bočního výtoku maziva z kontaktu. S každým dalším průchodem maziva kontaktem se v důsledku tohoto jevu snižuje tloušťka mazacího filmu. Dřívější studie, které se zabývali liniovými kontakty, tento efekt nezvažovali vůbec, jelikož se u liniového kontaktu boční výtok zanedbává. Autoři ovšem úplně zanedbali mechanismy znovudoplnění maziva do kontaktu. Z tohoto důvodu tento model pro vysoký počet průchodů vyústí v selhání filmu – tloušťka filmu se blíží nule, což není situace běžně pozorovaná experimentálně. Experimenty zde

byly účelově realizovány s velmi viskózními mazivy (1,2 Pas), aby nedocházelo ke znovu-vtékání maziva do valivé dráhy. V teoretickém modelu byl vliv zanedbán úplně.

Cannová a kol. [7] se zabývali definováním stavu, kdy dojde k přechodu z plně zaplaveného režimu do hladovějícího. V dřívějších pracích bylo uvedeno, že právě tato oblast je velmi citlivá na provozní podmínky a obtížně popsatelná. Autoři zde uvedli dílčí vlivy některých parametrů a prezentovali jeden unifikovaný parametr SD (Starvation Degree), který popisuje pomocí jednoho čísla úroveň hladovění v závislosti na několika vstupních hodnotách, jako např. valivé rychlosti (Obr. 2.4), množství maziva (Obr. 2.5), rozměrech kontaktu či viskozitě maziva.



Obr. 2.4 Vliv rychlosti valení na tloušťku mazacího filmu [7]

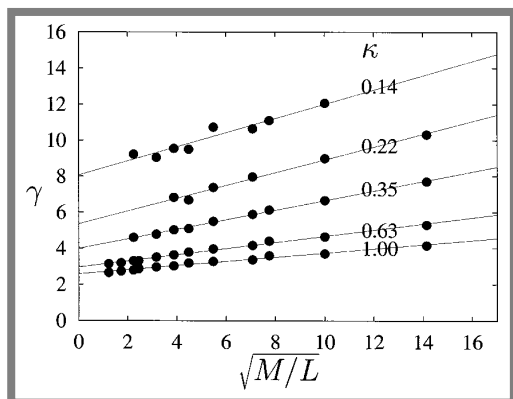


Obr. 2.5 Vliv množství maziva na tloušťku mazacího filmu [7]

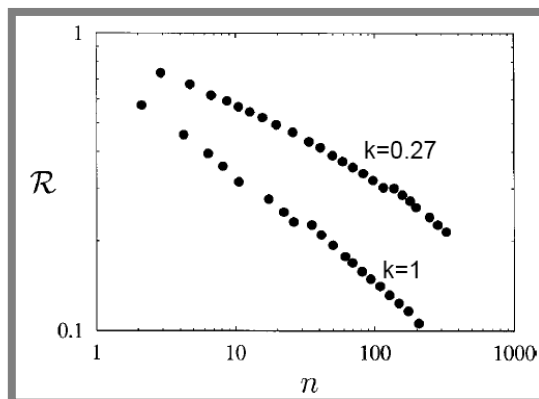
Damiens a kol. [1] dále rozvedli svou předchozí práci [4], kde autoři prezentovali model popisující hladovějící bodový EHD kontakt. V této práci [1] je uvedeno rozšíření modelu na eliptický kontakt. Hlavním záměrem práce bylo popsat vztah parametru γ k ostatním provozním veličinám a parametru elipticity k .

Na Obr. 2.6 lze pozorovat velikost vlivu rozdílných parametrů M a L (Moes) na parametr γ . Zde je patrný trend, že pro zvyšující se šířku kontaktu ve směru kolmém na směr valení dochází ke zvyšování odporu proti bočnímu výtoku γ . Toto je logický výsledek, jelikož pro liniový kontakt ($k \rightarrow 0$) lze boční výtok zanedbat úplně ($\gamma \rightarrow \infty$).

Na Obr. 2.7 je zobrazen výsledek experimentu měření redukce centrální tloušťky mazacího filmu (R) pro kruhový a eliptický kontakt v závislosti na počtu průchodů kontaktem n . Zde lze opět pozorovat nižší redukci pro eliptický kontakt. To je dáno jeho šířkou, která na základě Obr. 2.6 poskytuje větší odpor proti bočnímu výtoku γ .



Obr. 2.6 Vliv MOES parametrů M a L na hodnotu γ pro různé elipticity [1]



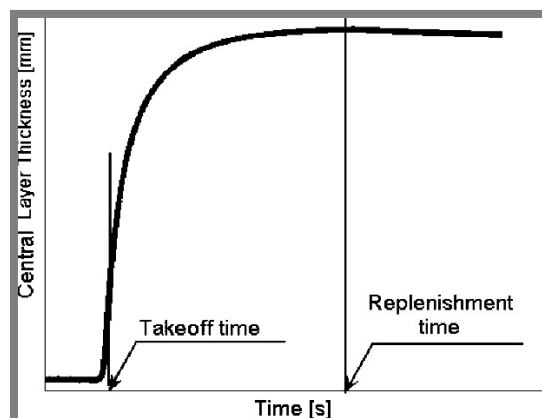
Obr. 2.7 Vliv počtu průchodů kontaktem n na redukci centrální tloušťky mazacího filmu R pro kruhový a eliptický kontakt [1]

2.3 POHYB MAZIVA – EFEKT DOPLŇOVÁNÍ

Chiu [8] jako jeden z prvních uvažoval jev, který působí proti mechanismu hladovění (bočnímu výtoku maziva) a to efekt znovu-doplňování maziva do valivé dráhy (replenishment). Pokud by totiž v modelech žádný takovýto jev nebyl zahrnut, tak by nepochybně po konečné době došlo k výtoku veškerého maziva z valivé dráhy a kontakt by se stal suchým. Mazivo má ovšem po průchodu kontaktem tendenci opět vytvořit rovnoměrnou vrstvu. Hlavní roli má v tomto dle autorů povrchové napětí. Intenzita jevu dále závisí na času mezi průchody kontaktem či na vzdálenosti mezi po sobě jdoucími kontakty.

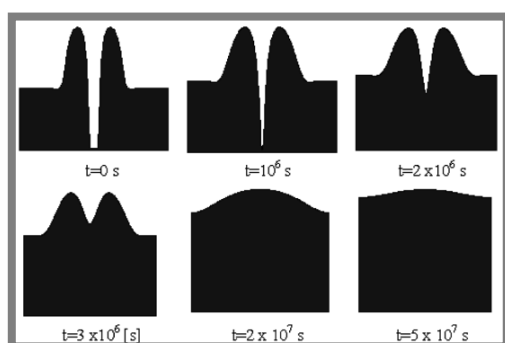
Významná práce byla publikována Gershunim [9], který doplnil existující model o vliv odstředivých sil, jelikož je jejich efekt zmiňován jako velmi podstatný pro reálné aplikace. V ložiskách pracujících při vyšších otáčkách může totiž docházet k velmi odlišným jevům právě v důsledku odstředivých sil.

Na Obr. 2.8 lze vidět, autory modelované, extrémně nelineární chování vrstvy maziva v důsledku povrchového napětí. Nelinearita je dána sledováním pouze středového bodu ve vrstvě maziva ve valivé dráze. Zpočátku se totiž k sobě přibližují pásy maziva po stranách dráhy a zmenšuje se mezera mezi nimi. Centrální tloušťka se nemění, ale celkový profil v kontaktu ano. Po setkání pásů ve středu valivé dráhy dojde k prudkému nárůstu tloušťky následovaného pozvolným přibližováním se profilu k rovinnému tvaru.

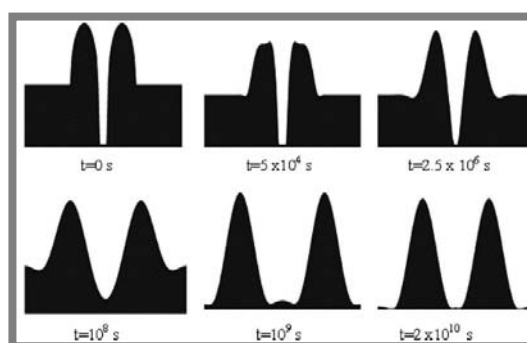


Obr. 2.8 Tloušťka mazací vrstvy uprostřed stopy jako funkce času [9]

Chování maziva na geometrii typické pro simulátor typu ball-on-disc je znázorněno na vypočtených profilech na Obr. 2.9. Zde je vidět zmíněnou nelineární změnu centrální tloušťky vrstvy maziva. Na Obr. 2.10 jde vidět doplnění výpočtu o zrychlení 1 m/s v normálovém směru vůči rozhraní maziva a podkladové vrstvy. Jde tedy o simulaci maziva na vnitřním kroužku ložiska. Zde je patrné, že i poměrně nízká odstředivá síla může způsobit negaci jevu procesu doplňování maziva.



Obr. 2.9 Chování volné vrstvy maziva v případě typickém pro ball-on-disc simulátor [9]

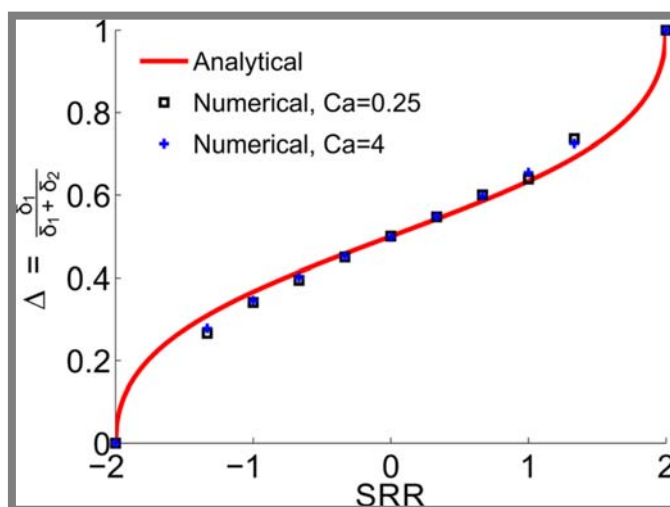


Obr. 2.10 Chování volné vrstvy maziva v případě typickém pro ball-on-disc simulátor s přidaným zrychlením -1 m/s [9]

Chováním maziva v rovině kolmé na kontaktní rovinu se zabýval např. Bruyerem [10], který teoreticky popsal poměr dělení maziva na výstupu z kontaktu. Tento poměr je velmi důležitý, jelikož definuje množství maziva dostupného pro další kontakt v pořadí, což je důležitá informace pro potřeby této disertační práce.

Studie realizovaná Bruyerem [10], zabývající se poměrem dělení maziva na výstupu kontaktu, zahrnuje i vliv skluzového poměru *SRR*. V části numerického modelu byly prezentovány výsledky rozdělení maziva. Na základě numerického řešení autoři navrhli analytický vztah

pro výpočet poměru dělení maziva na površích. Průběh poměru vypočtený na základě vztahu je uveden na Obr. 2.11.



Obr. 2.11 Analytický model pro výpočet poměru dělení maziva v závislosti na SRR [10]

Vztah, podle kterého byla data na Obr. 2.11 obdržena, je uveden níže (2.2). Z pohledu na vztah je patrný závěr, že poměr dělení maziva mezi dva povrchy je závislý jen a pouze na skluzovém poměru mezi povrchy.

$$\Delta = \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2} = \frac{1}{2} + \frac{SRR \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{SRR}{2} \right)^2} \right)}{-SRR^2 + 8 \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{SRR}{2} \right)^2} \right)} \quad 2.2$$

- Δ – poměr tloušťek maziva na kontaktních površích po výstupu z kontaktu
- $\delta_{1,2}$ – tloušťka filmu na povrchu 1 a 2
- SRR – skluzově valivý poměr $(u_1 - u_2)/u_m$
- $u_{1,2}$ – rychlost pohybu kontaktních povrchů 1 a 2
- u_m – střední rychlost

2.4 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ POZNATKU ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

Z teoretických prací (či jejich částí) je zřejmé, že dnešní modely dokáží velmi přesně předpovědět tloušťku mazacího filmu [1], [4], [11] za různých podmínek, což bylo i prokázáno experimentálně. Poměrně neprobádaná je oblast reálných povrchů, které jsou zejména rizikové pro kolaps mazacího filmu v kombinaci s hladověním. Pokroky v této oblasti

udělal Venner [12], [13], který rozšířil práci Chevaliera [4], [14]. Obecně v literatuře chybí práce zabývající se eliptickým kontaktem, což konstatoval i Lugt [2].

Hlavní problém v oblasti EHL hladovění je tloušťka vstupní vrstvy maziva [2]. Tento parametr totiž dokáže podstatně ovlivnit redukci tloušťky mazacího filmu zmenšením oblasti pro nárůst tlaku. Zoelen [3] ve své práci publikoval v kapitole trendů budoucího vývoje potřebu experimentů s vícenásobným kontaktem pro validaci již existujících modelů. Malá pozornost se doted' také věnovala problému pohybu maziva v kontaktu, jeho okolí, či přímo ve volné vrstvě mezi průchody valivého elementu. Tento jev má za následek změnu podmínek v kontaktu v závislosti na čase či počtech průchodů elementu [15], [9] a zejména pro reálné aplikace může způsobit významné odchylky od laboratorních měření.

V literatuře se někdy uvádí parametr h_{oil} jako množství (objem) maziva dávkovaného před kontakt a používá se jako objem maziva, které má kontakt k dispozici. Tento přístup není příliš přesný. Toto tvrzení lze vysvětlit jednoduchou úvahou: Při tloušťce mazacího filmu v kontaktu 500 nm, šířce kontaktu 300 μm a průměru disku zařízení typu ball-on-disc 120 mm, což jsou všechno průměrné parametry experimentu lze dopočítat hodnotu objemu maziva, které reálně prochází kontaktem na 0,057 μl . Sice je zde zanedbáno množství maziva, které ulpí na valivých elementech a další ztráty, ale lze si udělat představu o minimálním množství maziva, které je teoreticky potřebné pro vytvoření EHD kontaktu a realizaci experimentu. V praktických aplikacích je zbylé množství maziva využito pro další účely, jako například odvod tepla, ochrana proti korozi či odvod abrazivních částic, nicméně zde se uvažuje čistě objem potřebný pro formování EHD mazaného kontaktu. Při využití h_{oil} , jako objemu maziva, se pro podmínky hladovění používají objemy např. 20-50 μl , jak lze vidět např. v tomto článku [7] a na Obr. 2.5. Z tohoto důvodu je použití objemu maziva dávkovaného pro experiment na disk velmi nepřesné. Neexistuje totiž žádná kontrola, kolik maziva prochází tlakovou oblastí kontaktu a kolik kontakt pouze obtéká po stranách bez průchodu tlakovou oblastí. Mazivo, které kontakt obtéká po stranách je totiž pro potřeby kontaktu samotného téměř zbytečné. Z tohoto faktu vyplývá cíl disertační práce, jak je popsáno v další kapitole.

3 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Základní podstatou disertační práce je experimentální studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem. Vzhledem k rešeršní části je zřejmé, že v této oblasti je výrazná snaha o kvantifikaci úrovně hladovění. Parametr h_{oil} , označovaný jako tloušťka či množství maziva na vstupu kontaktu, může být jedním z možných a široce uplatnitelných způsobů. Studium vlivu tloušťky vrstvy maziva na vstupu kontaktu na tloušťku a distribuci mazacího filmu je tedy hlavním cílem.

Cílem této práce je tento problém experimentálně popsat a prokázat závislost mezi úrovní hladovění a tloušťkou vrstvy maziva, která vstupuje do kontaktu, nikoliv pouze množstvím dávkovaného maziva. Tyto výsledky je dále možné porovnat s uvedenou teoretickou studií [4].

Část experimentální:

- Modifikace experimentálního zařízení [16] nezbytné pro opakovatelnost měření.
- Návrh a výroba stírače maziva pro potřeby realizace experimentů.
- Úprava povrchu testovaných vzorků na požadovanou drsnost
- Stanovení závislosti mezi množstvím dodávaného maziva a stupněm hladovění.
- Studium vlivu vzájemné vzdálenosti kontaktů – efekt zpětného toku maziva do kontaktu.
- Zjištění poměru dělení maziva mezi dva povrchy na výstupu kontaktu. Zjištění vlivu skluzově-valivého poměru na tento parametr.
- Zjištění závislosti centrální tloušťky maziva a jeho distribuce na tloušťce maziva na vstupu kontaktu.

Část teoretická:

- Zpracování výsledků
- Vyhodnocení experimentů a zobecnění parametrů do formy bezrozměrných veličin.
- Porovnání obecné závislosti s teoretickým modelem a učinění obecných závěrů a nových, obecně platných, pravidel.

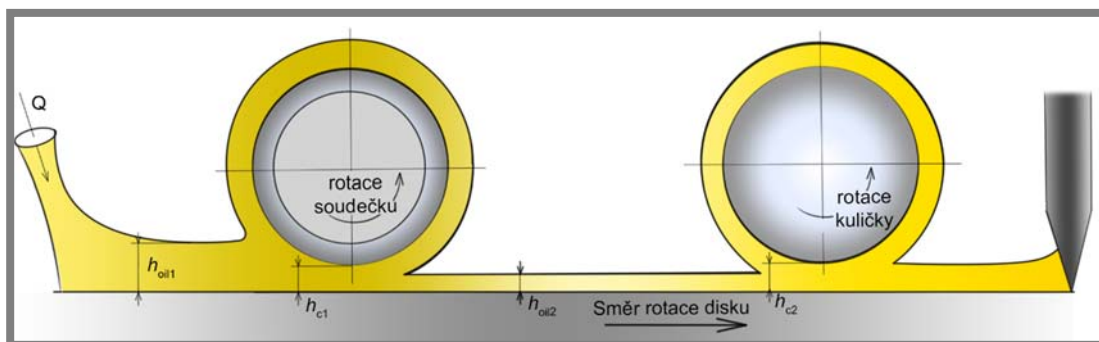
4 MATERIÁLY A METODY

4.1 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato část je rozdělena na několik podkapitol, podle hlavního cíle. První část obsahuje teoretický popis principu měření, popis experimentální aparatury a modifikace, které bylo nutno vytvořit pro úspěšné řešení vytyčeného problému. Dále je popsána část přípravy a měření vzorků použitých pro měření, včetně jejich vlastností. Poslední částí jsou metody použité pro vyhodnocování měření.

4.1.1 Teoretický popis principu měření

Princip měření spočívá v zařazení dvou valivých elementů do jedné valivé dráhy a současně v možnosti vyhodnotit tloušťku mazacího filmu u obou kontaktů v rychlém sledu. První valivý element slouží pouze jako nástroj k vytvoření vrstvy maziva. Druhý valivý element již vykazuje tloušťku mazacího filmu náležící podmínkám, kdy vstupuje vrstva maziva o tloušťce odpovídající tloušťce vrstvy vytvořené předchozím elementem. Metoda je názorně zobrazena na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Popis metody

Tloušťka mazacího filmu na vstupu kontaktu h_{oil} se z hlediska tohoto konceptu získá jako polovina centrální tloušťky prvního kontaktu h_{c1} a polovina tloušťky z druhého kontaktu h_{c2} . Sečtením těchto dvou tlouštěk obdržíme tloušťku maziva v blízkosti vstupu do kontaktu, označovanou jako h_{oil} (uvedeno v rov. 4.1). Další detaily týkající se konceptu jsou k dispozici v disertační práci [17].

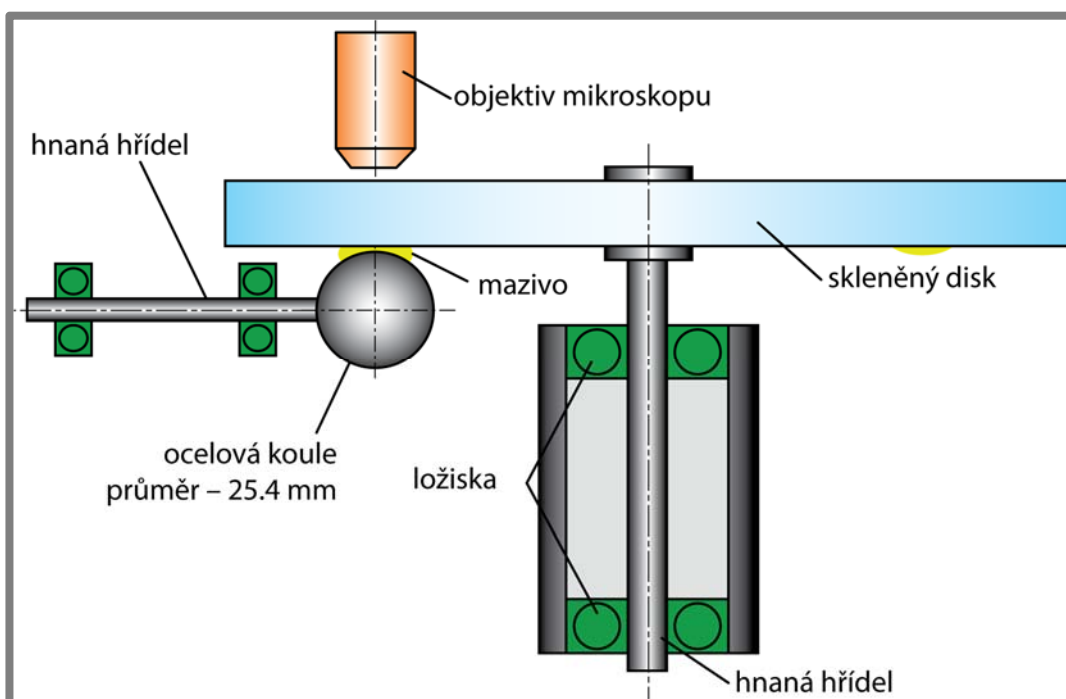
$$h_{oil} = \frac{h_{c1}}{2} + \frac{h_{c2}}{2} \quad 4.1$$

4.1.2 Popis experimentální aparatury

Metoda optické interferometrie a fluorescence, které jsou použity pro vyhodnocení, jsou popsány pouze v disertační práci [17], stejně jako použitý mikroskop a kamery. V této kapitole bude dále rozebrána pouze mechanická část experimentální aparatury.

Simulátor s jedním kontaktem

Použitá měřicí aparatura se zakládá na principu zařízení typu „ball-on-disc“, který byl poprvé navržen Goharem [18]. Jedná se o simulátor tribologického kontaktu, kdy se koule odvaluje po spodní straně skleněného disku, přes který se pozoruje kontaktní oblast a vyhodnocuje pomocí metody optické interferometrie či fluorescence.



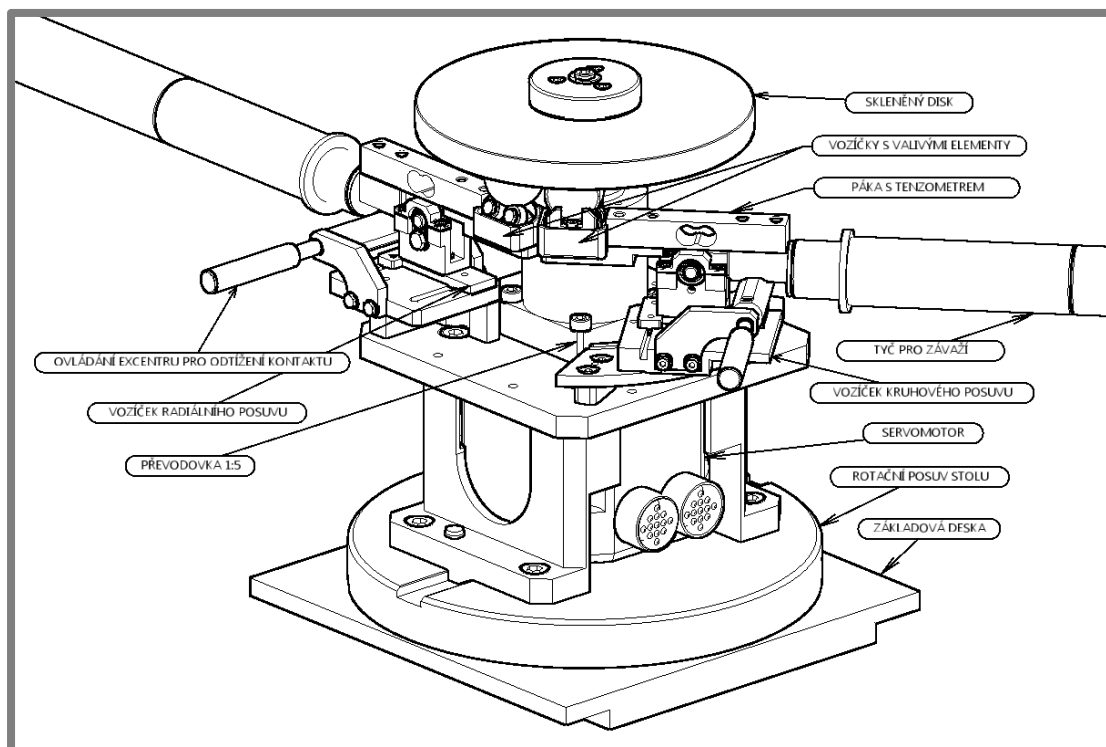
Obr. 4.2 Schéma standardního zařízení typu ball-on-disc

Simulátor s dvěma kontakty

V této práci byla nejvíce používána odlišná aparatura, která je modifikací zmíněného zařízení typu ball-on-disc. Byla ovšem navržena pro specifické potřeby výzkumu tématu této práce a poprvé již byla využita v diplomové práci autora [16] a byla popsána v samostatném článku [19].

Hlavním rozdílem je použití dvou valivých elementů. Skicu celého zařízení lze vidět na Obr. 4.3. Základními částmi jsou opět skleněný disk a dvě páky, které přitlačují valivé elementy a tím vytváří kontaktní oblasti. V této variantě zařízení je poháněn pouze disk a zařízení tak pracuje pouze

v režimu čistého valení. Valivé elementy jsou poháněny pouze trakční silou skrz mazací film elastohydrodynamického kontaktu. Výjimkou je použití popsané v kapitole 5.5.1 kde je použita varianta s prvním elementem hnaným elektromotorem pro dosažení vyšší tloušťky maziva. Celé zařízení je umístěno na stole, který umožňuje polohování ve dvou osách ve vodorovné rovině a dále rotaci celého zařízení kolem osy rotace disku. Tím je umožněno střídavé pozorování obou kontaktů pomocí jednoho mikroskopu.



Obr. 4.3 Skica experimentálního zařízení [16]

4.1.3 Modifikace aparatury

V rámci diplomové práce autora [16], ve které je zařízení popsáno detailněji, je uvedena kapitola trendů budoucího vývoje. V této kapitole jsou uvedeny i některé nedostatky experimentální aparatury, které byly zjištěny při zkušebních měřeních a v rámci diplomové práce nebyly dále řešeny. Jejich seznam je a popis řešení je uveden v disertační práci [17].

4.1.4 Experimentální materiál

Celkem byly pro experimenty použity dva různé typy disků: kovový (materiál 100Cr6) a skleněný (materiál BK7), oba o průměru 150mm; dva typy valivých elementů: koule a soudečky o různých poloměrech, všechny z materiálu 100Cr6, a několik typů olejů. Drsnosti všech měřených kovových povrchů byly upraveny na hodnoty menší než 20 nm a skleněný

disk je považován za opticky hladký. Detailnější parametry týkající se úpravy povrchů, fyzických vlastností či výčet použitých maziv je k dispozici v disertační práci [17].

4.2 TEORETICKÁ ČÁST

Do této části spadá zejména predikce vhodných experimentálních podmínek pro realizaci experimentů, statistické zpracování výsledků po jejich realizaci a analýza možných míst vzniku chyb.

4.2.1 Predikce parametrů experimentu

Predikce kontaktních parametrů byla tvořena zejména z důvodu možnosti aplikace metody optické interferometrie, která má měřitelný rozsah 0-800nm. Veškeré experimenty bylo tudíž nutné realizovat v tomto rozsahu. Pro predikci výsledné centrální a minimální tloušťky byly nejčastěji využity vztahy publikované Hamrockem a Dowsonem [20]. Tyto vztahy byly vybrány, jelikož jsou v publikacích nejrozšířenější a poskytují přijatelnou shodu mezi experimentem a predikcí.

V případě porovnávání tloušťky hladovějícího filmu s plně zaplavenou variantou bylo ve většině případů využito reálně naměřených hodnot pro plně zaplavený film.

4.2.2 Zpracování výsledků

Pro zpracování výsledků se využívá v jednodušším případě pouze průměrování více hodnot či v případě většího počtu výsledků regresní analýza. Každé měření bylo opakováno a následně vyhodnocena odchylka dvou měření. V případě uspokojivé shody byl použit průměr z obou hodnot. V případě neshody bylo měření zopakováno a chyba popsána či zdůvodněna. Analýza vlivu chyb byla realizována pomocí výpočtu směrodatné odchylky datových hodnot.

4.2.3 Porovnání s teorií

Výsledky zmíněného modelu jsou na Obr. 2.3. Data v tomto grafu pochází z numerického modelu, tudíž nebude reálně experimentálně pokryt její nejzazší hodnoty. Logické omezení například vyplývá z neschopnosti vytvořit tlustší vrstvu maziva, než kterou disponuje plně zaplavený kontakt ($H_0/H_{\text{eff}} \leq 1$). I přesto by měl být patrný trend dat.

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

Výsledky uvedené v této kapitole jsou rozděleny do několika podkapitol. První by se daly označit za ověřovací, jelikož objasňují některé jevy, které doprovázejí hlavní měření. Tyto výsledky již byly publikovány v podobě samostatných článků a příspěvků na konferencích a jsou uvedeny v kapitolách 5.3 a 5.4. Následují výsledky, na jejichž základě je možné popsat hlavní cíle disertační práce a porovnat je s teorií. Ty jsou uvedeny zejména v kapitolách 5.5 a 5.6.

5.1 KVANTIFIKACE HLADOVĚNÍ

Jelikož se tato práce zabývá zejména popisem a kvantifikací úrovně hladovění kontaktu, jsou v disertační práci [17] uvedeny a vysvětleny dva základní přístupy kvantifikace úrovně hladovění. Jedná se o polohu vstupního menisku a poměr mezi tloušťkou hladovějícího a plně zaplaveného kontaktu, čili parametr R . V disertační práci [17] je uvedeno i porovnání obou přístupů. Dle provedených experimentů lze učinit vlastní závěr, že od vzdálenosti menisku 0.6 násobku průměru kontaktu a více již nedochází k ovlivnění kontaktní oblasti a kontakt se chová jako plně zaplavený ($R \sim 1$). Současně lze vidět, že i při vzdálenosti menisku 0,1 je stále úroveň hladovění asi 0,35. To potvrzuje fakt, že poloha menisku není využitelná pro všechny úrovně hladovění.

5.2 SLABÁ MÍSTA NAVRŽENÉ METODY

Z navržené metody, uvedené v Obr. 4.1, vyplývají dva základní problémy či nejasnosti, které bylo zapotřebí vyjasnit a popsat před samotným měřením.

Prvním z nich je pojem doplňování maziva. Jak je zřejmé z konceptu, mezi kontakty je vždy nějaká vzdálenost, na které může dojít ke změně podmínek či tvaru stopy vytvořené prvním elementem. Tato problematika je studována v kapitole 5.3.

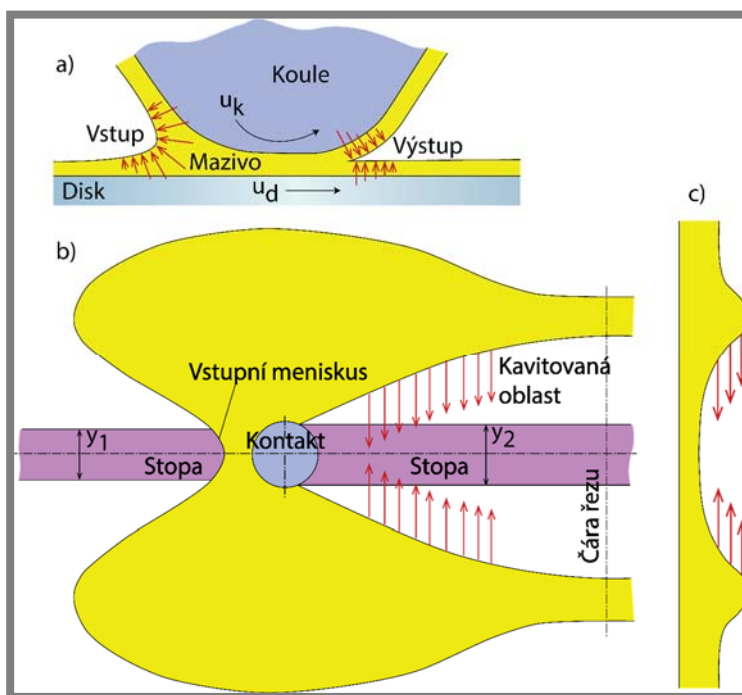
Druhým nejistým místem konceptu metody je předpoklad, že je mazivo po průchodu kontaktem rozděleno mezi dva povrchy (disk a valivý element) v poměru 0,5. Tento poměr totiž vystupuje ve vztahu (4.1) pro výpočet h_{oil} . Dalším aspektem je ovlivnění tohoto poměru při zavedení nenulového poměru kluzu-valení (SRR). Lze očekávat, že oba elementy pracují v režimu blízkém čistému valení, ale jelikož nejsou elementy poháněny, může docházet k lehkému prokluzu z důvodu odporu uložení valivého elementu. Je tedy zapotřebí znát, jak může případný skluz ovlivnit poměr dělení maziva na kontaktní povrchy po průchodu

kontaktem a změřit reálný skluz u experimentálního zařízení. Tento vliv je popsán v kapitole 5.4.

5.3 DOPLŇOVÁNÍ MAZIVA – VLIV VZÁJEMNÉ VZDÁLENOSTI KONTAKTŮ

Toto téma bylo zpracováno jako samostatná práce a prezentováno na konferenci STLE 2013 v Detroitu (viz příspěvky na konferencích). Současně byly některé výstupy z této části publikovány do recenzovaného časopisu MM Science.

Předpokladem bylo, že stopa, která se v mazivu na ploše disku při experimentu typu ball-on-disc vytvoří, pokračuje beze změny do druhého kontaktu. Toto tvrzení samozřejmě nemůže být pravdivé pro neomezeně dlouhý čas přechodu vytvořené stopy z jednoho kontaktu ke druhému. Základním cílem této studie bylo ověření chování volné vrstvy maziva a čas, za jaký již dojde ke změně, která významně ovlivní následující kontakt



Obr. 5.1 Doplnění maziva – ilustrace

Na Obr. 5.1 je celý proces detailně ilustrován. Obrázek má tři části (a, b, c). Jedná se o ilustrace několika pohledů. Nejvýznamnější oblast z pohledu této studie je v řezu c), která popisuje tzv. out-of-contact replenishment. Detailní popis druhého typu je uveden pouze v disertační práci [17]. Out-of-contact replenishment je způsoben zejména povrchovým napětím v mazivu. Na Obr. 5.1 je vidět v pohledu c) stopa vytvořená v mazivu průchodem elementu. Jedná se o řez, vytvořený

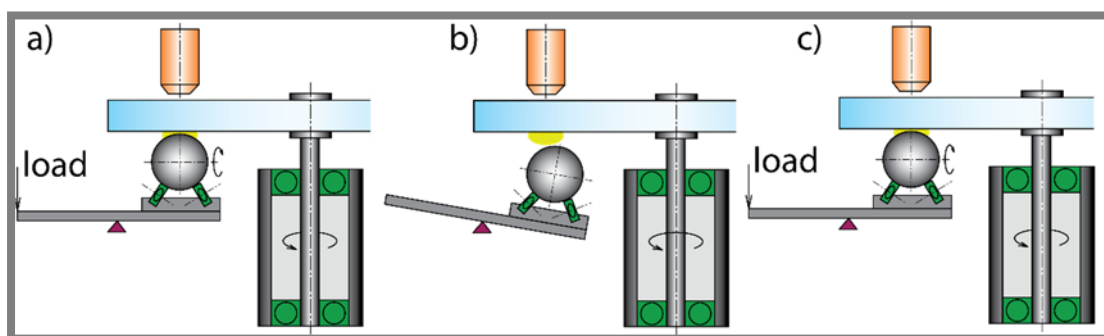
z pohledu b) v místě označeném „čára řezu“. Snahou maziva je zaujmout co nejmenší povrch, za což je zodpovědné zejména povrchové napětí, které zapříčiní zpětné zaplavení valivé stopy mazivem. To jen potvrzuje, že se jedná o jev, který je nestacionární a je potřeba mít jej v případě experimentů se dvěma elementy pod kontrolou.

Dalším cílem této studie bylo experimentálně ověřit model publikovaný Gershunim [9] a uvedený v přehledu současného stavu poznání na Obr. 2.8.

5.3.1 Hladovění – jeden kontakt

V disertační práci [17] je k dispozici komplexnější popis měření. V této části je prezentována jen finální verze experimentů bez detailnějšího popisu. Nákres jednotlivých bodů postupu experimentu je na Obr. 5.2.:

- S jedním valivým elementem a při dané rychlosti 400 m/s dojde k vytvoření valivé stopy v mazivu.
- Po určité době, kdy dojde ke stabilizaci úrovně hladovění kontaktu na hodnotě parametru $R=0,2$ se valivý element odpojí z dráhy pomocí zatěžovací páky a disk se po zvolenou dobu otáčí stále stejnou rychlostí, ovšem bez kontaktu s elementem.
- Po daném čase dojde k opětovnému zapojení elementu do valivé dráhy a změření tloušťky mazacího filmu v tomto okamžiku.

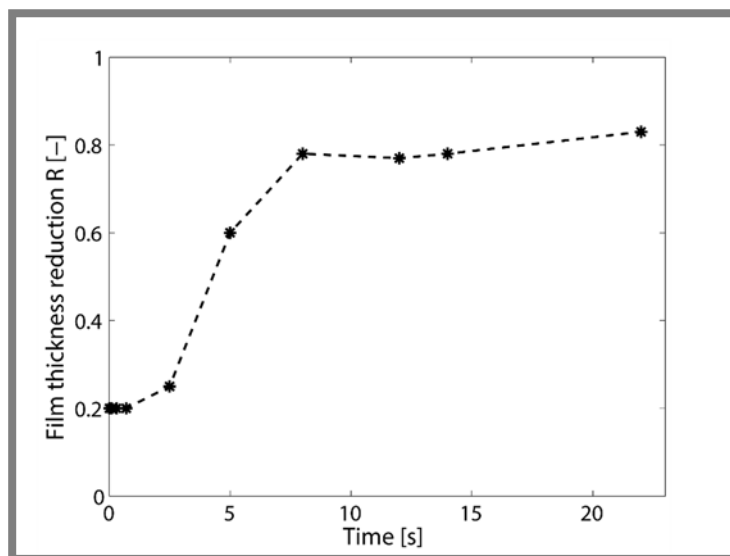


Obr. 5.2 Koncept experimentu s jedním elementem

Výsledky obdržené touto metodou jsou vykresleny do grafu na Obr. 5.3. Metodika obdržení výsledků pro krátké časy ($< 0,5$ s) je uvedena pouze v disertační práci [17].

Podobnost se zmíněnou křivkou na Obr. 2.8. Je více než zřejmá. Jednou nejasností je fakt, že ani po obnovení mazacího filmu ve vyšších časech nedojde k návratu tloušťky mazacího filmu na hodnotu $R=1$. Tento jev je pravděpodobně způsoben nestacionárním chováním kontaktu v době

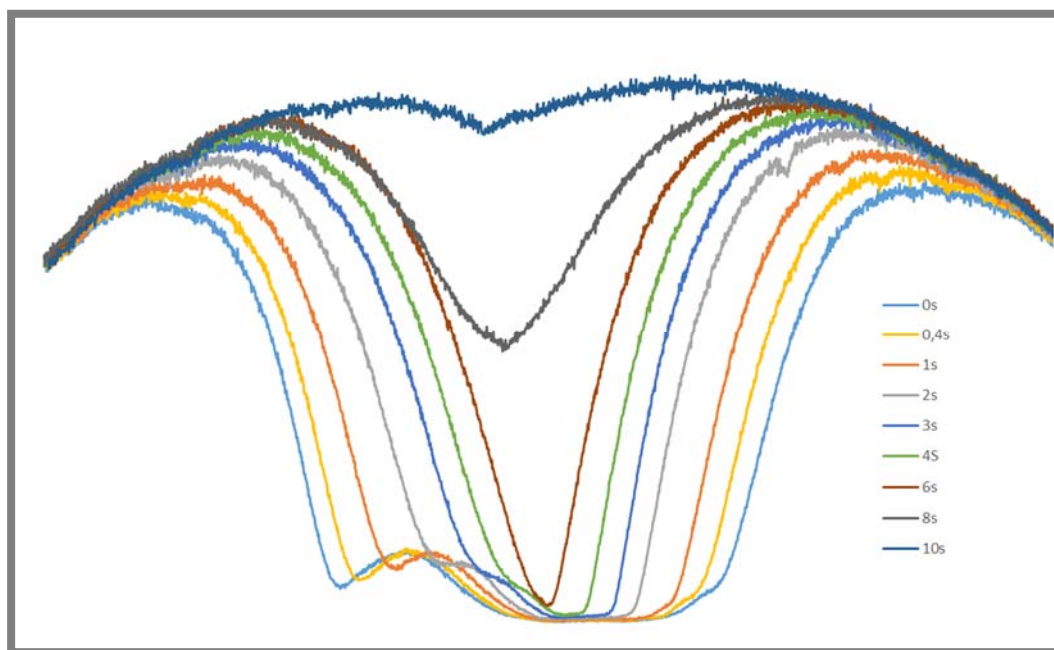
těsně po zapojení valivého elementu. V této chvíli může docházet k menšímu prokluzu, který způsobí snížení tloušťky filmu.



Obr. 5.3 Změna tloušťky maziva ve středu stopy v závislosti na čase

5.3.2 Profil stopy v mazivu

Za účelem objasnění nelineárního chování změny tloušťky v centrální části stopy byly měřeny kompletní profily tloušťky maziva. Detailní popis měření je uveden v disertační práci [17]. Zde je uveden pouze nejreprezentativnější výsledek obdrženy pomocí metody fluorescence.



Obr. 5.4 Profily vrstvy maziva ve stopě v mazivu za koulí

Výsledky pro jednotlivé časy jsou uvedeny na Obr. 5.4. Stopy zde vykreslené jsou měřeny asi 20 mm za kontaktem. Tato vzdálenost při valivé rychlosti 200 mm/s odpovídá času 0,1 sekundy, což je čas, který lze vzhledem k naměřeným hodnotám zanedbat. Z grafu je patrné, že časy odpovídají předchozím měřením pomocí optické interferometrie a zlomový okamžik změny stopy nastává mezi 6. a 8. sekundou.

5.3.3 Obecný závěr

Tato část se zabývala studiem chování stopy vytvořené ve vrstvě kapalného maziva průchodem valivého elementu tzv. out-of-contact replenishment, neboli doplňování maziva. Bylo popsáno chování centrální části stopy v čase a současně byl ověřen z hlediska chování teoretický model. Bylo také prokázáno extrémně nelineární chování maziva při zaplavování stopy. Toto chování je v souladu s teorií a v disertační práci bylo detailněji popsáno.

5.3.4 Závěr pro potřeby řešení disertační práce

Hlavním cílem pro potřeby konceptu vytvořeného pro splnění cíle této disertační práce bylo ověřit, jestli je vrstva, která je vytvořena průchodem valivého elementu, bez významnější změny dopravena diskem ke druhému kontaktu. Kritický čas pro měřitelnou změnu centrální části stopy byl na základě této studie stanoven na 3 sekundy. To je mnohem delší čas, než je potřebný pro většinu experimentů. Lze tedy konstatovat, že tento děj měření neovlivní. Jako první element navíc bude použit soudeček, který vytváří širší stopu, takže se tento děj dá očekávat ještě podstatně delší.

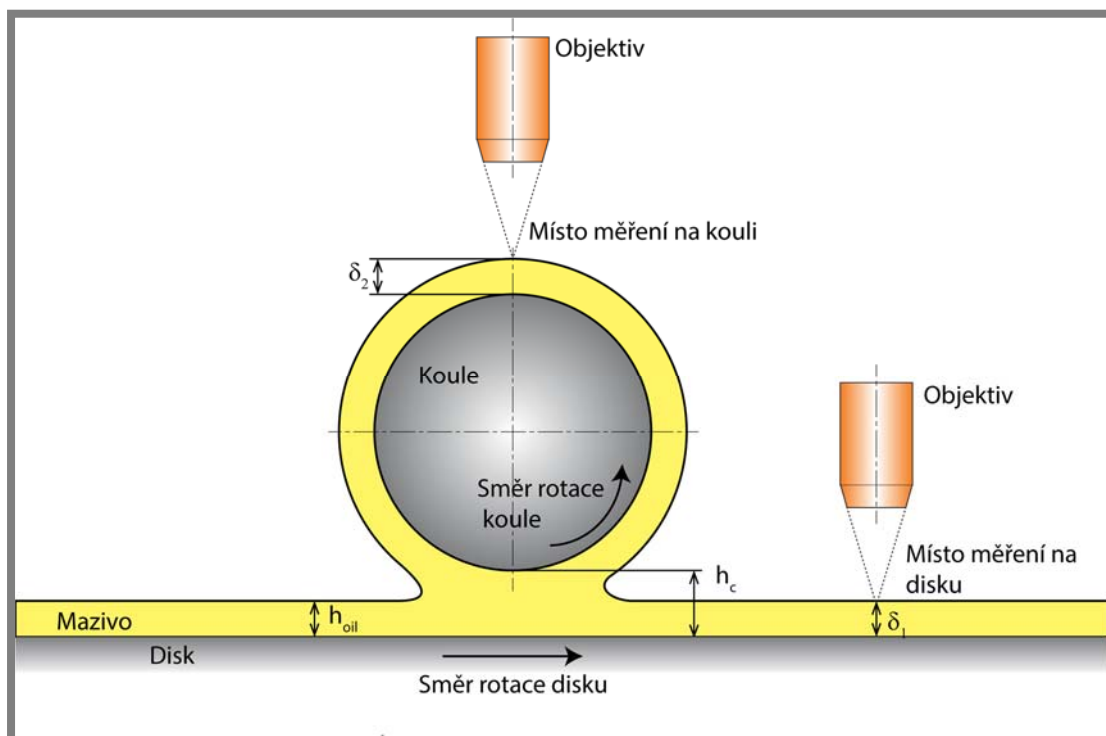
5.4 POMĚR DĚLENÍ MAZIVA PO PRŮCHODU KONTAKTEM

Koncept vytvořený pro řešení disertační práce obsahuje další předpoklad, který doposud nebyl plně objasněn a je popsán v kap. 5.2.

Dalším problémem je zmíněný prokluz valivých elementů. Bylo provedeno měření pomocí bezkontaktního otáčkoměru, které prokázalo přítomnost skluzu v míře do 4 % vůči valivé rychlosti disku. Disk je poháněn servomotorem s resolverem a jeho chod je kontrolován ovládacím softwarem. Zde je tedy změna rychlosti kontrolovatelná.

Skluz o velikost 4% je pro měření tloušťky EHD filmu sice téměř zanedbatelný, nicméně vliv skluzu na poměr dělení maziva znám není. I z tohoto důvodu byla vytvořena další studie, která se touto problematikou zabývala.

Některé závěry z této části byly prezentovány na konferenci TFC 2014 v Chicagu a výsledky byly publikovány do časopisu Tribology Letters .



Obr. 5.5 Koncept měření poměru vrstev maziva na výstupu [21]

5.4.1 Modifikace aparatury

Pro experimenty za účelem ověření teoretického modelu chování maziva na výstupu z kontaktu publikovaného Bruyerem [10] bylo modifikováno experimentální zařízení popsané v kapitole 4.1. Modifikace byla nezbytná z důvodu nevhodnosti aparatury použité v předchozí kapitole vzhledem k této aplikaci. Při měření poměru maziva na površích opouštějících kontakt nelze použít metodu optické interferometrie kvůli absenci polo-odrazivého rozhraní mezi diskem, mazivem a koulí. Jednoduše řečeno se měří pouze volná vrstva maziva a není přítomna plocha, na které by došlo k rozdělení svazku světla, jako je tomu u měření v kontaktní oblasti.

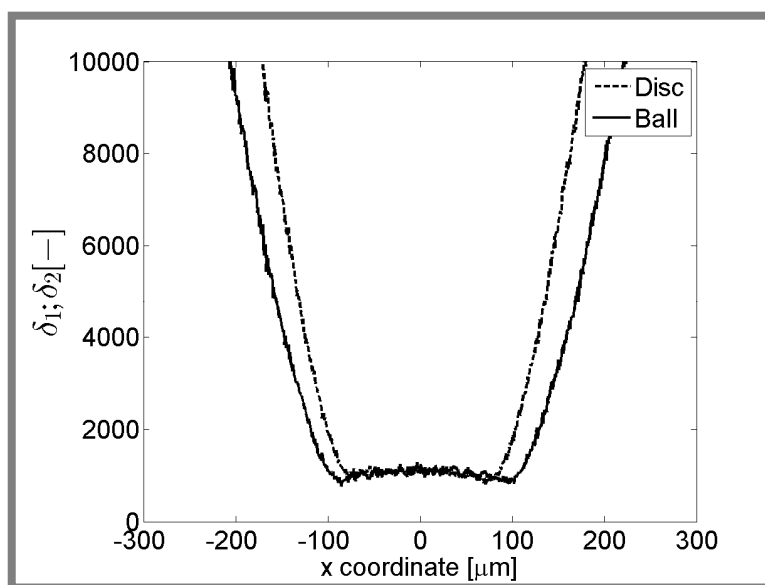
Pro tuto aplikaci se jako ideální, díky svému principu, jeví metoda fluorescence. S rostoucí tloušťkou látky produkující fluorescenci lineárně roste také intenzita jeho fluorescence. Princip této metody je detailněji popsán v disertační práci [17]. Zde bude již jen popsán koncept měření a modifikace experimentálního zařízení. Důležité ovšem je, že není zapotřebí dvou rozhraní pro dělení svazku světla, jako je tomu u interferometrie.

Byla zvolena inverzní varianta aparatury ball-on-disc, oproti těm použitým v ostatních kapitolách. Ta spočívala v přemístění koule ze

spodní strany disku na horní stranu. Koncept je zřetelný z Obr. 5.5. Měření bylo prováděno střídavě na jednu a druhém místě. Další popis principu měření a metodiky vyhodnocení je k dispozici v disertační práci [17].

5.4.2 Výsledky rozložení tloušťky pro podmínky čistého valení

Naměřené profily obou stop (koule; disk) jsou vidět v grafu na Obr. 5.6. Z grafu je patrné, že jsou profily téměř identické. Další diskuze je obsažena v disertační práci [17].



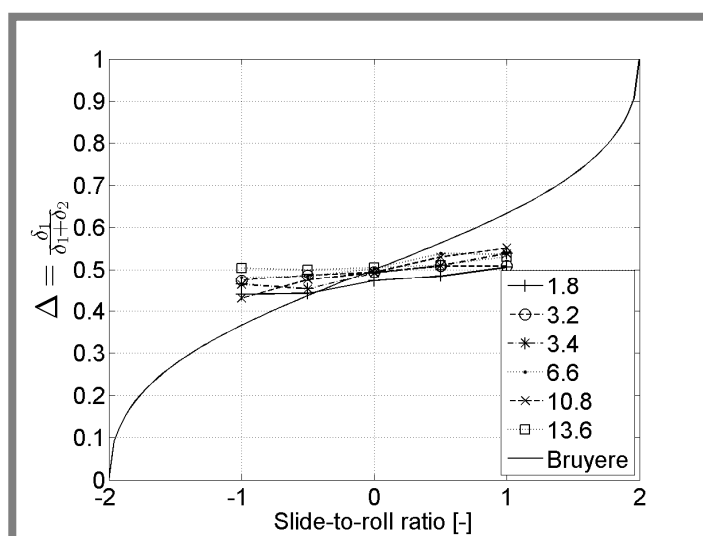
Obr. 5.6 Profily stop při čistém valení [21]

5.4.3 Výsledky rozložení tloušťky pro podmínky různých hodnot skluzového poměru

V této části byl zkoumán vliv skluzově valivého poměru SRR na poměr mezi vrstvami maziva na kontaktních površích a jeho možné ovlivnění různou geometrií kontaktních těles, vlastností maziva či valivé rychlosti. Bruyere [10] ve své teoretické studii popisuje, že se vlivem měnícího skluzového poměru zvyšuje tloušťka maziva na rychlejšímu povrchu na úkor pomalejšího až do hodnoty, kdy pro čistý skluz všechno mazivo procházející kontaktem ulpívá na pohybujícím se povrchu. Cílem tedy bylo ověřit toto chování. Výsledky pro vliv valivé rychlosti, vlastností maziva a geometrie jsou uvedeny pouze v disertační práci [17]. Zde jsou uvedeny pouze souhrnné výsledky.

5.4.4 Kapilární číslo a porovnání s teorií

V této části je cílem experimentálně zjištěné chování dělené dle jednotlivých vlivů v předchozích kapitolách sjednotit pomocí jednoho parametru do jednoho grafu a porovnat s teorií. Tímto parametrem by mohlo být kapilární číslo, jak bylo definováno v teoretickém článku ohledně této problematiky. To se vypočítá jako součin viskozity maziva a střední rychlosti povrchů dělený povrchovým napětím. Kapilární číslo tedy zahrnuje všechny parametry, až na vliv geometrie, který zde tedy nebude uveden. Konkrétní podmínky jsou uvedeny v Tab. 6.1 uvedené v disertační práci [17].



Obr. 5.7 Poměr delta pro 6 různých kapilárních čísel v závislosti na SRR a porovnání s teorií. [21]

Experimentální výsledky (Obr. 5.7) jsou rozptýleny od 0,43 po 0,5 pro $SRR = -1$ a od 0,51 po 0,55 pro $SRR = 1$. Nejvyšší rozdíl je vidět u případu s kapilárním číslem 10,8, kde je rozdíl mezi $SRR = -1$ a 1 kolem 0,12. Nejnižší rozdíl s hodnotou 0,03 byl ovšem naměřen pro kapilární číslo 13,6. Ani u ostatních čísel není pozorovatelný jasný trend. Z tohoto lze usoudit, že kapilární číslo není určujícím parametrem tohoto chování, což potvrzuje tvrzení z literatury.

Vztah mezi Δ a SRR prezentovaný Bruyerem [10] je vykreslen pro porovnání do téhož grafu. Chování popsané teoreticky bylo potvrzeno. Pomalejší ze dvou povrchů opouštějících kontaktní oblast obsahuje menší množství maziva než ten rychlejší. Při experimentech byla tato závislost ovšem pozorována ve znatelně menší míře, než je tomu u teorie.

5.4.5 Obecný závěr a shrnutí

Tato práce se zabývala studiem a popisem poměru Δ , ve kterém se dělí mazivo opouštějící kontakt mezi dva povrchy kontakt vytvářející. Předpoklad pro čisté valení byl potvrzen, tedy vrstva se dělí rovnoměrně mezi dva povrchy. Poměr Δ je tedy 0,5. Pro podmínky nenulového skluzu, tedy $SRR \neq 0$ by mělo docházet k přesunu části maziva z pomalejšího povrchu na rychlejší a to až do podoby, kdy je pro čistý skluz ($SRR = 2;-2$) všechno mazivo odnášeno pohybujícím se povrchem. Tento stav studován nebyl, ale již i pro $SRR = 1$ bylo chování potvrzeno. Trend je ovšem mnohem mírnější. Pro porovnání lze rozdíl vyčíslit. Poměr pro $SRR = 1$ je dle teorie 0,63. Průměrná hodnota z experimentů je 0,53. Pro $SRR = -1$ teorie stanovuje poměr 0,37, ale při experimentech byla průměrně zjištěná hodnota rovna 0,48. Výsledek se nezdá být závislý ani na jednom ze studovaných vlivů jako povrchové napětí maziva, viskozita, střední rychlost či geometrie povrchů.

5.4.6 Závěry pro potřeby řešení disertační práce

Tato práce byla realizována zejména pro potvrzení předpokladu, že je mazivo po průchodu kontaktem rovnoměrně děleno mezi dva povrchy. Pro čisté valení byla tato hypotéza potvrzena a díky tomu lze použít koncept pro měření tloušťky maziva na vstupu kontaktu (h_{oil}).

Bylo ovšem zmíněno, že zařízení, na kterém toto měření bude probíhat, vykazuje drobnou úroveň skluzu způsobenou nepoháněným valivým elementem. Tento prokluz byl měřením vyčíslen na 4%. To znamená, že povrch valivého elementu se otáčí o 4% pomaleji, než povrch disku. Převeďeno na hodnotu skluzový poměr se jedná o hodnotu $SRR = 0,04$. Poměr Δ vyčíslený pro tuto hodnotu SRR na základě průměrných experimentálních výsledků odpovídá hodnotě 0,50043. Výsledné ovlivnění tloušťky, pro běžně měřené hodnoty filmu, je na úrovni setin nanometrů, což je zanedbatelné. Závěrem tedy lze konstatovat, že je potvrzeno dělení maziva na dvě stejné poloviny pro čisté valení i pro mírné skluzy způsobené přenosem trakční síly pouze přes vrstvu maziva v kontaktu.

5.5 VLIV TLOUŠŤKY MAZIVA NA VSTUPU KONTAKTU NA ÚROVEŇ HLADOVĚNÍ

Některé výsledky z této oblasti již byly realizovány a publikovány v časopisu Tribology International [19]. Jedná se o částečné výsledky, které jsou dostupné v disertační práci [17], zde je uveden pouze hlavní

výsledek, jehož cílem je experimentální popis chování hladovějícího kontaktu na základě změny parametru h_{oil} teoreticky popsaného Chevalierem [4].

5.5.1 Způsob realizace experimentů

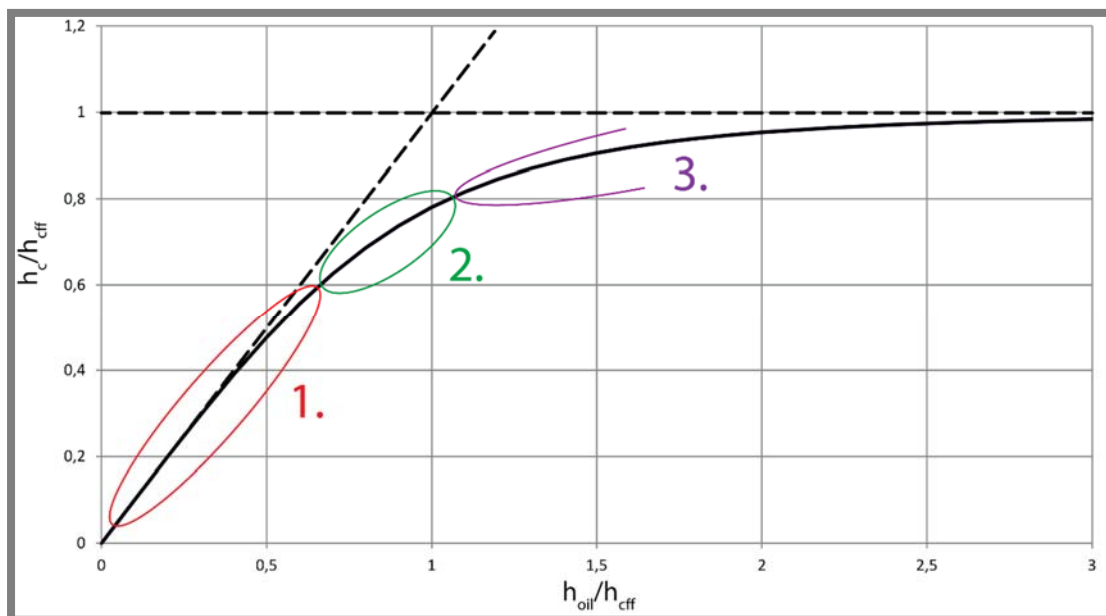
Popsání téměř celé teoretické křivky uvedené na Obr. 2.3 v rozsahu experimentálně dosažitelných podmínek lze realizovat kombinací tří typů experimentů. Orientační umístění oblastí je znázorněno v grafu na Obr. 5.8.

1. Jednoduchá modifikace experimentu s konstantním množstvím maziva umožní popis nízkých hodnot h_{oil} . Zde je ovšem potřeba řešit problém s opakovatelností měření způsobený nehomogenitou distribuce tloušťky mazacího filmu prvního kontaktu, který je hladovějící. To lze realizovat pomocí, v předchozí kapitole popsaného, stírače. Ten funguje jako třetí kontakt, který lze zařadit do systému a použít pro re-distribuci maziva.
2. Střední oblast h_{oil} bude popsána pomocí experimentů s plně zaplaveným prvním kontaktem pomocí dávkování maziva před kontakt a odebrání maziva stíračem. Širší rozsah hodnot tloušťky maziva na vstupu h_{oil} lze zajistit pomocí použití soudečků s různou geometrií, případně změnou zatížení kontaktu.
3. Pro tvorbu vyšších hodnot tloušťky h_{oil} , než lze vytvořit podle bodu 2, je využito zvýšení valivé rychlosti prvního kontaktu pomocí nezávislého pohonu prvního elementu, čímž dojde ke zvýšení střední hodnoty rychlosti u_m a tím i celkovému navýšení tloušťky mazacího filmu. V tomto uspořádání je ovšem již zapotřebí kompenzovat změnu poměru tlouštěk maziva na výstupu kontaktu dle kap. 5.4.

Výsledky z těchto tří typů experimentů jsou zkombinovány do jednoho grafu na Obr. 5.9.

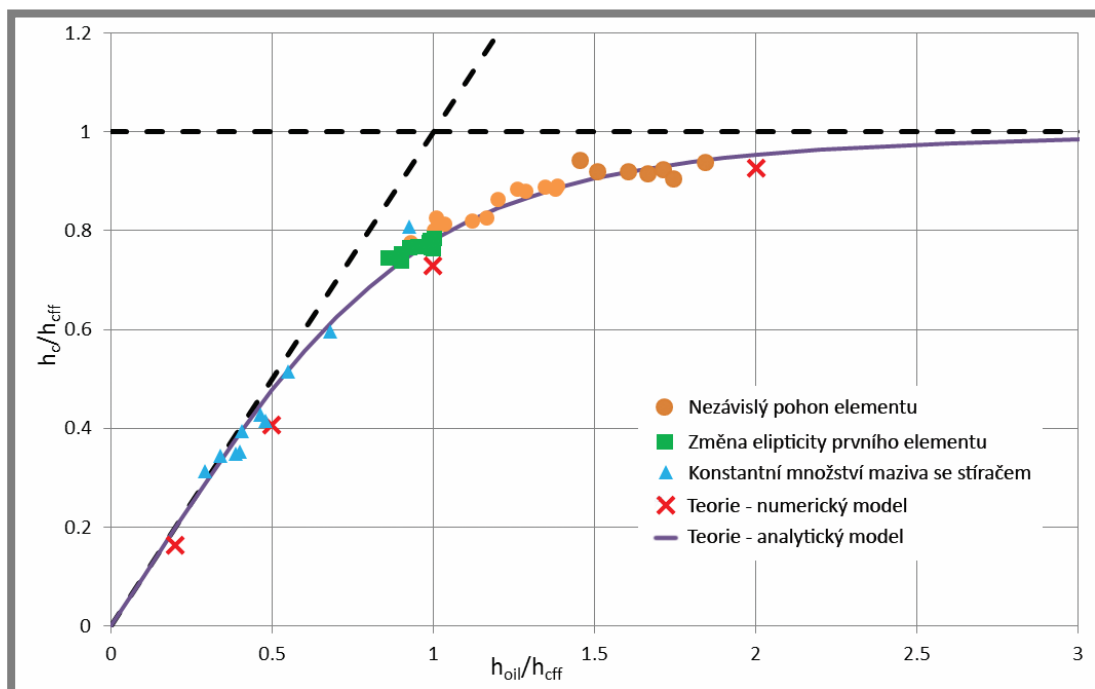
V tomto grafu jsou uvedeny i teoretické predikce. Čárkovanou čarou je vyznačeno předpokládané teoretické chování při izo-viskózním režimu, plnou čarou je znázorněna predikce chování reálného kruhového EHD kontaktu. Červené křížky pak uvádí numerickou predikci stejného autora pro srovnatelné podmínky. V tomto grafu jsou vyneseny výsledky numerického modelu pro podmínky s Moesovými parametry $L = 10$ a $M = 100$. Tyto výsledky jsou zde uvedeny, jelikož jsou nejbližší podmínkám, při kterých byly realizovány experimenty. Konkrétně vypočtené Moesovy parametry dle parametrů experimentu jsou $L = 9,75$ a $M = 119$. Autoři v článku uvádí, že je vliv těchto parametrů na chování kontaktu minimální,

takže je drobná odchylka hodnot považována za přijatelnou pro porovnání teorie a experimentů.



Obr. 5.8 Znázornění oblastí s různým experimentálním přístupem

Experimentální výsledky na Obr. 5.9. jsou zobrazeny modrými trojúhelníky pro data obdržena metodou dle bodu 1 kap. 5.5.1. Zelené čtverce jsou pak obdrženy za pomoci metody 2 a oranžové kroužky jsou vykresleny pomocí nezávislého pohonu prvního elementu, tzn. metody 3.



Obr. 5.9 Závislost mezi tloušťkou maziva na vstupu a centrální tloušťkou

5.5.2 Zpracování dat

Nutno ještě zmínit, že na osách uvedených grafů jsou uvedena malá písmena h , což znamená konkrétní hodnoty tloušťek filmů. V teoretických studiích se téměř vždy uvádí velká H , což jsou hodnoty bezrozměrných tloušťek. Pro převod na bezrozměrné hodnoty se musí změřená tloušťka filmu podělit hodnotou redukovaného parametru křivosti, který je v tomto případě $6,35 \times 10^{-3}$. Jelikož jsou ovšem na obou osách dvě tloušťky v poměru, stejně by došlo ke zkrácení této proměnné. Z toho důvodu je uváděna konkrétní hodnota tloušťky.

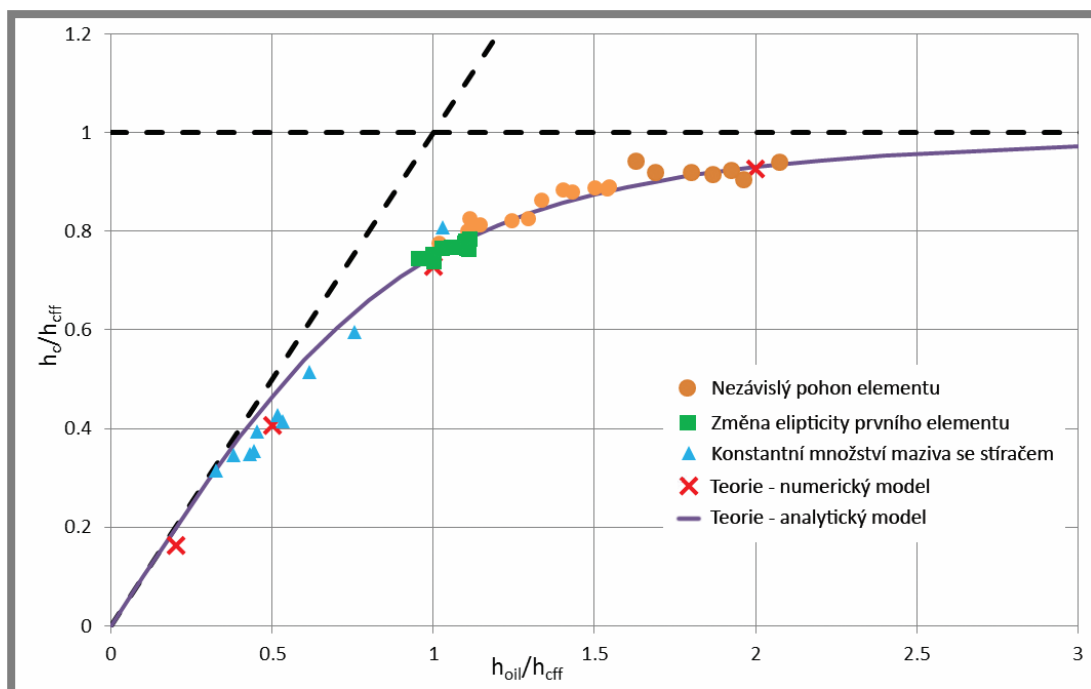
V grafu na Obr. 5.9. jsou uvedeny výsledné hodnoty tloušťek tak, jak byly naměřeny. Pro přesné vyhodnocení je ovšem nutné data kompenzovat na dva vlivy. Data z grafu na Obr. 5.8 doplněné o níže popsané korekcemi jsou zahrnuty do grafu na Obr. 5.10.

Prvním vlivem je prokluz použitý pro část dat měřených metodou dle bodu 3. Tato část se tedy týká pouze dat, která jsou získána pomocí aparatury s poháněným elementem. Zavedení prokluzu ovlivní vzorec použitý pro výpočet h_{oil} , přičemž ostatní hodnoty zůstanou nedotčeny. Díky tomu dojde k posunu datových bodů v grafu doprava či doleva. Popis výpočtu korekce a její vliv je popsán v disertační práci [17].

Druhým vlivem, který byl zvažován je stlačitelnost maziva. Výsledky v grafu na Obr. 5.9 tento vliv neuvažují, přestože je hodnota h_{oil} v literatuře uváděna za atmosférického tlaku, tudíž nestlačená. Pokud chceme porovnat výsledky s literaturou, musíme vliv stlačitelnosti maziva zahrnout do mechanismu výpočtu h_{oil} . Pro kompenzaci stlačitelnosti v rámci této práce je využit vztah podle Dowson-Higginsona, který je vytvořen pro předpověď změny hustoty minerálních olejů v závislosti na tlaku, což je v souladu s použitými mazivy. Popis výpočtu korekce a její vliv je dále rozveden v disertační práci [17].

Pokud porovnáme grafy před korekcí (Obr. 5.9) a po korekci (Obr. 5.10), je zřejmé, že stejný efekt mělo v teoretické studii dělení výsledků relativní hustotou maziva. Tento vliv je vidět na rozdílu mezi obrázky 2.9 a 2.10 v disertační práci [17]. Obrázek 2.9. by měl odpovídat výsledkům po korekci, jelikož je zde uvažována stlačitelnost maziva. Naopak v grafu na 2.10. jsou výsledky za účelem objektivnějšího porovnání děleny relativní hustotou, což neguje vliv stlačitelnosti maziva. Posun dat, zejména v části hladovějícího kontaktu je obdobný.

Další výsledky od tohoto místa jsou již uváděny včetně uvažovaných korekcí. Výsledky z grafu na Obr. 5.9 doplněné o zmíněné korekce jsou vykresleny v grafu na Obr. 5.10.



Obr. 5.10 Výsledky zkorigované na dva zmíněné vlivy (*SRR* a kompresibilita maziva)

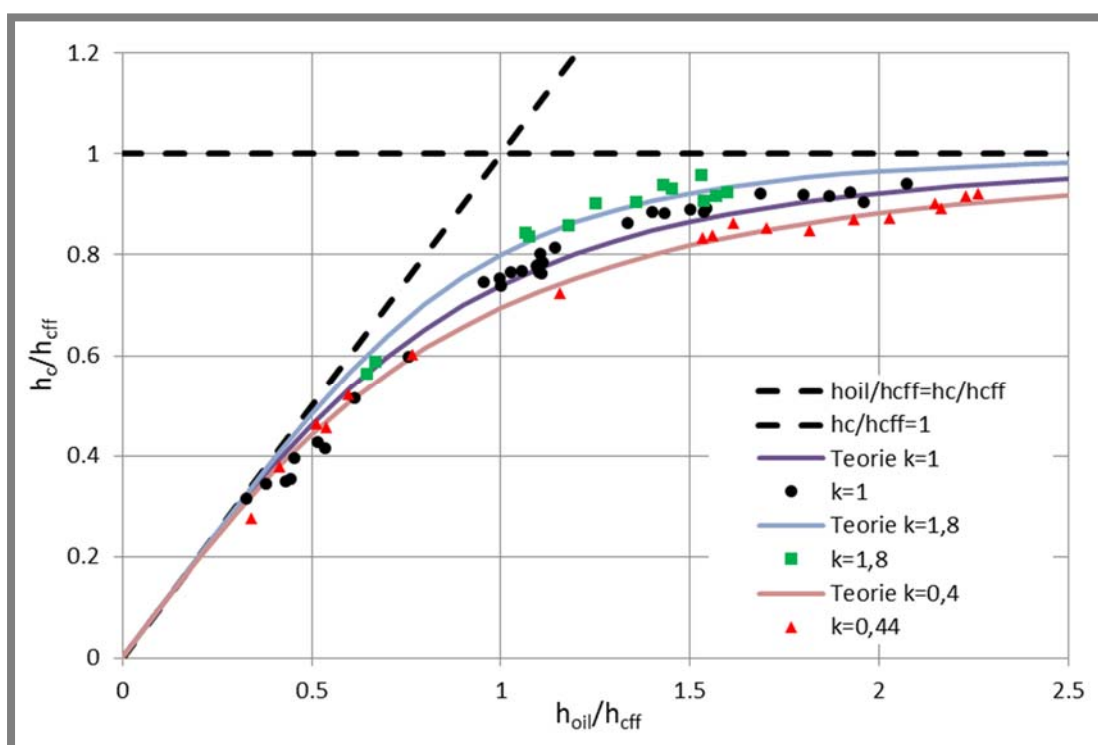
5.6 VLIV PARAMETRU γ NA ZÁVISLOST HOIL NA HC

Damiens ve své práci [1] popsal parametr γ , který byl poprvé využit Chevalierem [4] jako odpor proti bočnímu výtoku a definoval jej na základě kontaktní geometrie a provozních podmínek. Tento parametr se také používá v analytickém vztahu pro výpočet teoretické křivky, která je použita v grafu na Obr. 5.9. V tomto grafu je na základě teoretické práce zvolen parametr $\gamma = 2,8$ pro variantu bez korekcí a 2,4 pro korigovanou na *SRR* a stlačitelnost maziva, což je ve shodě s teorií.

V této kapitole je dále popsána snaha o experimentální ověření vlivu parametru γ na závislost mezi vstupní vrstvou maziva a úrovní hladovění. Dle Obr. 2.6. by nejvýznamnější změnu parametru γ měla způsobit změna geometrie valivého elementu za eliptický. V uvedeném článku [1] jsou elipticity uváděny v opačném poměru, $k < 1$ tedy znamená širší stopu. V této disertační práci je konvence opačná. Pokud jsou zvoleny vhodné soudečky namísto koule, která byla použita při všech předchozích experimentech, jako druhý kontakt, měl by být patrný rozdíl ve studované závislosti.

Pro měření byly použity dva soudečky. Jeden měl elipticitu menší, než je tomu u koule, konkrétně $k = 0,44$ (2,27 dle konvence článku [1]) a druhý naopak větší, $k = 1,8$ (0,55 dle konvence článku [1]). Jako první valivý element, který vytváří vrstvu maziva, byl použit soudeček s elipticitou 4, jelikož ten jediný je schopen vytvořit dostatečně širokou stopu i pro soudeček s elipticitou 2 použitý v druhém kontaktu.

Výsledné hodnoty tloušťek jsou vykresleny v grafu na Obr. 5.11. V tomto grafu je jako hodnota γ pro výpočet teoretické křivky použita hodnota 1,9; 2,3 a 3,1 pro valivý element o elipticitě 0,44; 1 a 1,8. Tyto hodnoty byly voleny tak, aby orientačně respektovali teoretické modely z článku [1] a současně poskytovali nejbližší proložení experimentálních dat. V článku nejsou uvedeny konkrétní hodnoty, ale pouze graf, ze kterého lze odečíst hodnoty γ , proto lze použít pouze odhadnuté hodnoty. Spolehlivost proložení dat byla kontrolována odchylkou sumy hodnot vůči teorii. Dle voleného parametru γ byly dle experimentálních hodnot h_{oil}/h_{cfl} dopočítány hodnoty h_c/h_{cfl} a jejich celková suma byla srovnána se sumou experimentálních výsledků. Rozdíl byl vždy pod hodnotu 1 %.



Obr. 5.11 Vliv parametru γ na poměr mezi h_{oil} a h_c

5.7 VLIV CHYB A JEJICH ANALÝZA

Tato kapitola je ponechána pouze v plné verzi disertační práce. Zde lze zmínit pouze zhodnocení, že u obou použitých metod byla naměřena maximální odchylka o velikosti 1,6 % z měřených hodnot. To lze považovat za zanedbatelnou hodnotu. Všechna provedená měření jsou tedy validní.

6 SHRNUTÍ A ZÁVĚR

Tato disertační práce se zabývá studiem EHD kontaktu při nedostatečném zásobování mazivem a popisem procesů tento děj doprovázející. V první části je shrnut současný stav poznání v oblasti hladovějících EHD kontaktů. Přehledová část je zpracována od první zmínky o hladovění v roce 1966 až po nejnovější poznatky jak z teoretické, tak experimentální oblasti. Specificky jsou vyčleněny práce, které se zabývají studiem pohybu maziva, resp. jeho vtékání zpět do valivé dráhy vytvořené průchodem valivého elementu. Při hladovějících podmínkách se většinou jedná o velmi malé množství maziva, takže jeho ztráty těmito jevy jsou podstatné pro chování mazacího filmu a jeho hlubší pochopení. Výsledky jsou obdrženy zejména pomocí optické metody - kolorimetrické interferometrie. V některých částech je navíc využita metoda fluorescenční mikroskopie pro studium volné vrstvy maziva mimo kontaktní oblast. Závěry z této práce lze rozdělit do tří hlavních kapitol. První dvě byly studovány zejména pro ověření platnosti některých předpokladů. I tyto studie byly ovšem původní a lze z nich vyvodit nové poznatky. Ty jsou ovšem uvedeny pouze v disertační práci [17]. Třetí částí jsou pak samotné závěry ohledně chování kontaktu za podmínek hladovění, což bylo hlavním cílem této práce.

Experimenty bylo potvrzeno, že pro dané provozní parametry odpovídá chování teoretické predikci. Zajímavým faktem, který se povedlo ověřit je množství maziva na vstupu, které kontakt vyžaduje pro provoz v plně zaplaveném režimu. Pojem plně zaplavený režim je zde na místě, jelikož pro takovéto podmínky musí být dodávána před kontakt vrstva maziva, která je násobně vyšší, než je tloušťka filmu kontaktu samotného. Závislost je asymptotická, nicméně z praktického hlediska lze říci, že již 95 % tloušťky ekvivalentního plně zaplaveného kontaktu lze považovat za dostačující. V takovém případě musí být před kontaktem zhruba dvojnásobná tloušťka maziva, než je tloušťka filmu v kontaktu. Pokud je před kontaktem k dispozici stejná tloušťka vrstvy, jako by byla tloušťka v plně zaplaveném kontaktu, tak by byla tloušťka filmu v kontaktu nižší o 20 %.

Důvodem pro toto chování je mechanismus toku maziva kolem kontaktu. I přes nedostatek maziva a blízkost menisku dochází u části maziva, které je bezprostředně před kontaktem k jeho toku ve směru kolmém ke směru valení. Tento boční tok je současně i fundamentálním důvodem vzniku a zhoršování úrovně hladovění v kontaktech, které jsou podrobeny opakovaným průchodům. Při každém průchodu valivého elementu místem kontaktu dojde k vytlačení části maziva do strany, a pokud není mazivo před dalším průchodem doplněno zpět, dochází

k postupnému snižování tloušťky maziva v kontaktu. Toto snižování se zastaví, či výrazně zpomalí až na úrovni, kdy již před kontaktem neexistuje vstupní meniskus a nárůst tlaku je extrémně rychlý a začíná téměř na hranici kontaktní oblasti. Z výsledků experimentů lze pozorovat, že tato hranice odpovídá úrovni hladovění kolem 30-40 % tloušťky plně zaplaveného kontaktu.

Chování popisované v předchozím odstavci poměrně očekávatelně závisí na provozních parametrech jako zatížení, rychlosti, viskozitě maziva apod., zejména ovšem na geometrii kontaktu. Širší kontakt poskytuje větší odpor proti toku maziva do stran. Mazivo se jednoduše nestihne před vstupem do kontaktu dostat tak daleko. Tento parametr je definován v literatuře jako odpor proti bočnímu toku a je označován symbolem γ . Teoreticky je již popsán jeho vliv na úroveň hladovění při známé vstupní tloušťce maziva. Z teorie vyplývá, že nejvýznamnější změna se dá očekávat právě změnou geometrie kontaktu. Vliv geometrie kontaktu byl studován rozšířením některých výsledků i o experimenty s elementy o různé elipticitě. Byla prokázána teoreticky predikovaná změna chování v tom smyslu, že kontakty s nižší elipticitou, které jsou náchylnější k bočnímu toku maziva, vyžadují více maziva na vstupu, aby produkovaly stejnou tloušťku jako kontakty s vyšší elipticitou. Tyto poznatky vyplývají z grafu na Obr. 5.11.

Poznatky by bylo vhodné v rámci budoucího výzkumu rozvinout na oblast plastických maziv, jelikož je dle literatury [22] je asi 90 % všech valivých ložisek provozovaných na světě mazáno plastickými mazivy. Jejich komplexní reologie, jak popisuje např. Lugt [23], [24], dělá popsání experimenty ještě složitějšími. Jelikož se plastické mazivo skládá asi z 90 % ze základového oleje a jen z 10 % ze ztužovačů, dá se očekávat obdobné chování jako pro základové oleje samotné. Ztužovač by nicméně mohlo pomoci snížit boční výtok maziva a poskytnou lepší provozní parametry. Tyto hypotézy by bylo vhodné taktéž experimentálně ověřit.

Dále by bylo vhodné rozšířit studii ohledně doplňování maziva do kontaktu. Během studia bylo pozorováno několik zajímavých procesů, které nebyly úplně objasněny, jelikož to nebylo hlavním cílem této práce. Zajímavé by bylo například empiricky ověřit vzájemný vliv dvou parametrů, viskozity a povrchového napětí, na intenzitu procesu doplňování maziva. Z provedených experimentů totiž nevyplynul jasný závěr z tohoto pohledu.

Stejně tak by bylo vhodné rozšířit výsledky ohledně mechanismů chování maziva na výstupu z kontaktu a poměr dělení maziva mezi kontakty. Zde také nebyl zjištěn žádný dominantní vliv, přestože drobné rozdíly pro některé provozní veličiny pozorovány byly.

7 LITERATURA

- [1] DAMIENS, B., C.H. VENNER, P.M.E. CANN a A.A. LUBRECHT *Journal of Tribology*. Starved Lubrication of Elliptical EHD Contacts. 2004, (126): 105-111.
- [2] LUGT, P. M. a G. E. MORALES-ESPEJEL *Tribology Transactions*. A review of elasto-hydrodynamic lubrication theory. 2011, (54): 470-496.
- [3] ZOELLEN, M. *Thin layer flow in rolling element bearings*. University of Twente, Netherlands, 2009. Ph. D. thesis.
- [4] CHEVALIER, F., A. A. LUBRECHT, P. M. E. CANN, F. COLIN a G. DALMAZ *Film Thickness in Starved EHL Point Contacts*. 1998, (120): 126-133.
- [5] ORCUTT, F. K. a H. S. CHENG *Gryo-Spin Axis Hydrodynamic Bearing Symposium*. Lubrication of Rolling Contact Instrument Bearings. 1966, (2).
- [6] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON *Journal of lubrication technology*. Isothermal EHL point contacts, part I - theoretical formulation. 1976, (98): 223-229.
- [7] CANN, P. M. E., B. DAMIENS a A. A. LUBRECHT *Tribology International*. Transition between fully flooded and starved regimes in EHL. 2003, (37): 859-864.
- [8] CHIU, Y.P. *ASLE Transactions*. An analysis and prediction of lubricant film starvation in rolling contact systems. 1974, (17): 25-35.
- [9] GERSHUNI, L., M. G. LARSON a P. M. LUGT *Tribology Transactions*. Replenishment in Rolling Bearings. 2008, (51): 643-651.
- [10] BRUYERE, V., N. FILLOT, G. E. MORALES-ESPEJEL a P. VERGNE *Journal of Tribology*. A two-phase flow approach for the outlet of lubricated line contacts. 2012, 4(134).

- [11] B.J. HAMROCK, D.. *Journal of Tribology*. Isothermal EHL point contacts, Part IV, starvation results. 1977, (99): 15-23.
- [12] VENNER, C. H., G. BERGER a P. M. LUGT *Journal of Tribology*. Waviness Deformation in Starved EHL Circular Contacts. 2004, 2(126): 248-257.
- [13] VENNER, C. H., G. POPOVICI, P. M. LUGT a M. ORGANISCIAK *Film Thickness Modulation in Starved Elastohydrodynamically Lubricated Contacts Induced by Time-Varying Lubricant Supply*. *Journal of Tribology*. 2008, 4(130).
- [14] CHEVALIER, F., A. A. LUBRECHT, P. M. E. CANN, F. COLIN a G. DALMAZ *Tribology series*. Starvation Phenomena in EHL Point Contacts: Influence of Inlet Flow Distribution. 1996, (31): 213-223.
- [15] PEMBERTON, J. a A. CAMERON *Wear*. A mechanism of fluid replenishment in elastohydrodynamic contacts. 1976, (37): 184-190.
- [16] KOŠŤÁL, D. *Studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem*. 2011. Diplomová práce.
- [17] KOŠŤÁL, David. *Experimentální studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem*. Brno, 2015, s. 138. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [18] GOHAR, R. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. A Ball-Plate Machine for Measuring Elastohydrodynamic Oil Films. 1967, (182): 43-45.
- [19] SVOBODA, P., D. KOSTAL, I. KRUPKA a M. HARTL *Tribology International*. Experimental study of starved EHL contacts based on thickness of oil layer in the contact inlet. 2013, (67): 140-145.

- [20] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON *Journal of Tribology*. Isothermal EHL point contacts, Part III - Fully flooded results. 1977, (99): 264-276.
- [21] KOŠTÁL, D, D NEČAS, P ŠPERKA, P SVOBODA, I KŘUPKA a M HARTL. Lubricant Rupture Ratio at Elastohydrodynamically Lubricated Contact Outlet. *Tribology Letters* [online]. 2015, 59(3): - [cit. 2015-08-03]. DOI: 10.1007/s11249-015-0565-7. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11249-015-0565-7>
- [22] CEN, H., P. M. LUGT a G. MORALES-ESPEJEL On the Film Thickness of Grease-Lubricated Contacts at Low Speeds. *Tribology Transactions* [online]. 2014, 57(4): 668-678 [cit. 2015-08-03]. DOI: 10.1080/10402004.2014.897781. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402004.2014.897781>
- [23] LUGT, P. M., S. VELICKOV a J. H. TRIPP On the Chaotic Behavior of Grease Lubrication in Rolling Bearings. *Tribology Transactions* [online]. 2009, 52(5): 581-590 [cit. 2015-08-03]. DOI: 10.1080/10402000902825713. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402000902825713>
- [24] LUGT, P. M. A Review on Grease Lubrication in Rolling Bearings. *Tribology Transactions* [online]. 2009, 52(4): 470-480 [cit. 2015-08-03]. DOI: 10.1080/10402000802687940. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402000802687940>

8 CURRICULUM VITAE

8.1 OSOBNÍ ÚDAJE

Ing. David Košťál, nar. 1985 ve Zlíně

8.2 VZDĚLÁNÍ:

- 2011 – 2015 Doktorské studium na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně. Téma disertační práce: Studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem
- 2009 - 2011 Magisterské studium na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně. Téma diplomové práce: Studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem. Ukončeno s vyznamenáním
- 2005 – 2009 Bakalářské studium (prezenční) na Vysokém učení technickém v Brně, fakulta Strojního inženýrství, obor strojní inženýrství Téma bakalářské práce: Datové přenosové formáty v oblasti CAD.
- 2001 – 2005 SPŠ Zlín, obor strojírenství, zaměření CAD/CAM systémy. Škola ukončena maturitou z Českého jazyka, Angličtiny, Stavby a provozu strojů a Strojírenské technologie

8.3 OCENĚNÍ:

- 2011 – Stipendista programu Brno PhD Talent (3roky)
- 2011 – Cena děkana
- 2011 – Cena nadace preciosa

8.4 PRAXE:

- 2008 – 2011 – MCAD Specialista ve spol. Adeon
- 2005 – 2005 – Konstruktor v MTEC Zlín-Malenovice (dříve Silosystem)

8.5 AKADEMICKÉ AKTIVITY:

8.5.1 Výuka cvičení:

- CAD (3CD)
- Konstruování a CAD (4KC)
- Konstruování (BK)
- Konstrukční projekt (ZIP)
- Tribologie (ZTR)

8.5.2 Řešené projekty:

- 2014 - Inovace výuky předmětu tribologie o vyhodnocování tloušťky mazacího filmu v kontaktu nedostatečně zásobovaném palivem. FV 14-07
- 2014 - Studium tření, opotřebení a mazání kloubních náhrad. FSI-S-14-2336
- 2013 - Studium tribologických aspektů kontaktu kola a kolejnice s ohledem na nedostatečnou distribuci maziva. FSI-J-13-2096
- 2012 - Studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem. FSI-J-12-1783
- 2011 - Vliv povrchových nerovností na utváření mazacího filmu. FSI-S-11-11/1187

8.5.3 Řešené hospodářské smlouvy:

- 2014 - Expertní analýza životnosti pro nový typ válečkových ložisek
- 2014 - Analýza uložení ložiska rotoru drtiče
- 2014 - Výzkum vlivu konzervantu na vlastnosti mazacího (turbínového) oleje
- 2014 - Vývoj a realizace nového tribometru pro spol. Honda
- 2013 - Tvorba částí katalogu pro ZKL

8.5.4 Produkty:

- 2015 - Rychloupínání valivých elementů mezi hroty pro simulátor tribologického kontaktu. 28050, funkční vzorek.
- 2015 - Lapovací aparatura pro dokončování povrchu soudečků. 114360, užitný vzor.
- 2015 - Lapovací aparatura pro dokončování povrchu soudečků. 114360, funkční vzorek.
- 2014 - Adaptivní stírač kapaliny pro simulátor kontaktu. 27726, funkční vzorek.
- 2013 - Zatěžovací mechanismus. 23870, funkční vzorek.
- 2013 - Rotační viskozimetr. 26706, funkční vzorek.
- 2013 - Tribological contact simulator. 25667, užitný vzor.
- 2013 - Tribologický simulátor valivého ložiska. 25805, užitný vzor.
- 2012 - Systém zajištění osy rotace valivého elementu pro tribologický simulátor. 26499, funkční vzorek.
- 2011 - Systém uložení a zatěžování valivých elementů pro simulátor hladovějícího kontaktu. 25602, funkční vzorek.
- 2011 - Simulátor hladovějícího kontaktu (vícenásobný kontakt). 25515, funkční vzorek

8.5.5 Publikace a konference:

Seznam publikací a příspěvků na konferencích je k dispozici v disertační práci.

8.6 JAZYKOVÉ ZNALOSTI: Angličtina na úrovni (B2/C1)

ABSTRAKT

Tato disertační práce se zabývá experimentálním studiem elastohydrodynamického kontaktu za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem. Další vědecké studie v této oblasti jsou zaměřeny z větší části teoreticky a je zde tudíž nedostatek prací za účelem ověření modelů. V prezentovaných modelech lze dohledat dva základní způsoby kvantifikace úrovně hladovění: pomocí polohy vstupního menisku a podle tloušťky vrstvy maziva na vstupu. Druhá metoda je mnohem univerzálnější vzhledem k rozsahu provozních podmínek, nicméně poměrně obtížně experimentálně dosažitelná. Tato práce prezentuje původní experimenty za účelem popisu chování a kvantifikace úrovně hladovění při přesně definované tloušťce maziva na vstupu kontaktu. Hlubší poznání procesů probíhajících v hladovějícím elastohydrodynamickém kontaktu umožní vývoj přesnějších modelů, zpřesnění schopnosti predikovat tento stav a vyhnout se mu již ve fázi návrhu klíčových tribologických uzlů.

ABSTRACT

The dissertation thesis deals with an experimental study of an elastohydrodynamic contact under insufficient lubricant supply. Theoretical studies published in this research area focus mainly on the development of theoretical models and there is an insufficient number of experimental studies which validate these models. There are two basic methods of starvation severity control in published theoretical models: by positioning of an inlet meniscus and by setting the thickness of an oil layer in the vicinity of contact inlet. The second method is more suitable when considering a wide range of operating conditions, however it is difficult to ensure experimentally. This thesis presents original experimental results and aims to describe the starvation severity level as a function of the inlet film thickness. Deeper understanding of fundamental processes in starved elastohydrodynamic contacts enables the development of more precise models, better ability of prediction of the starvation and improves the ability to avoid starvation in the early design process of key tribological components.